การศึกษาและพัฒนาการควบคุมการผลิตกระแสไฟฟ้า
ด้วยเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

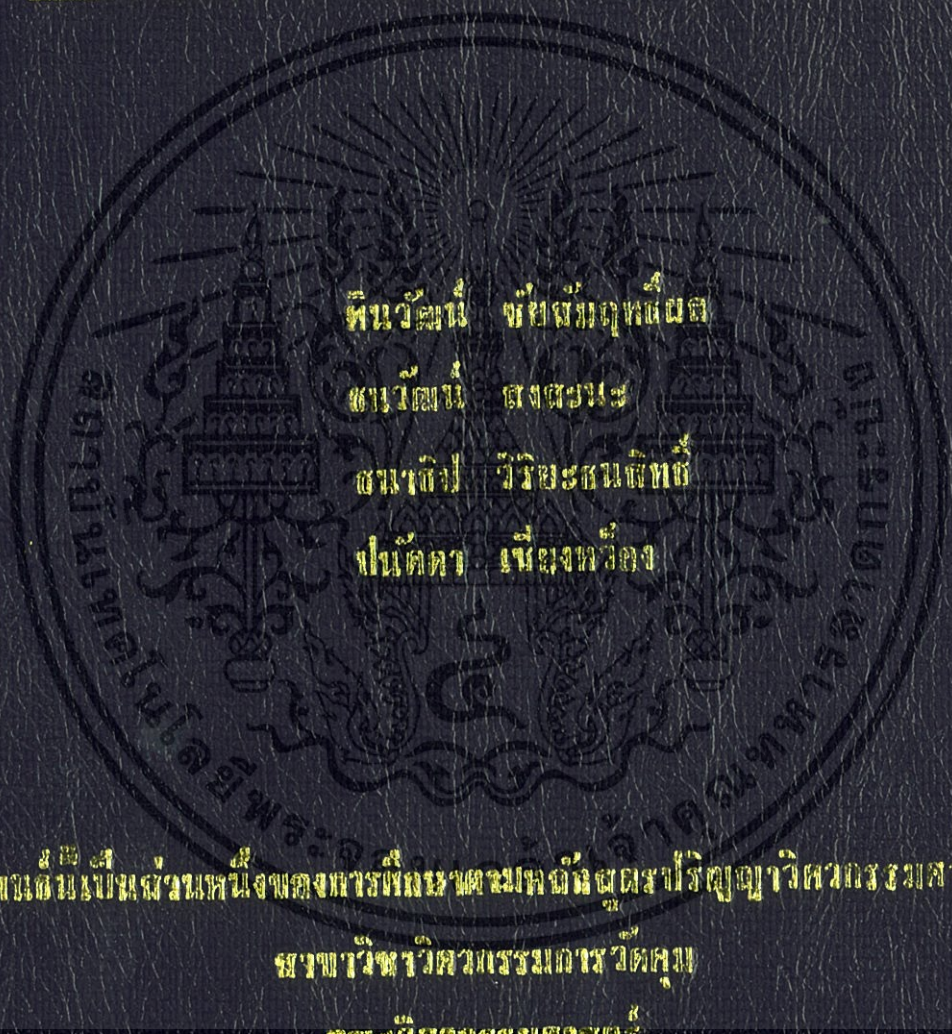
STUDY OF DEVELOPMENTATION AND CONTROL ELECTRICITY GENERATION BY STIRLING ENGINE

ทินวัฒน์ ชัยชัยกุศล

ชาวัฒน์ สงสระน้อย

ชนาธิป วิริยะธนชิตชัย

ปนัดดา เชียงหวัง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

การศึกษาและพัฒนาการควบคุมการผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

STUDY OF DEVELOPMENTATION AND CONTROL ELECTRICITY GENERATION BY STIRLING ENGINE

ทินวัฒน์ ชัยสัมฤทธิ์ผล
ธนวัฒน์ สงสะนะ
ธนาธิป วิริยะธนสิทธิ์
ปนัดดา เซี่ยงหว็อง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY AND DEVELOPMENT CONTROL ELECTRICITY BY STIRLING ENGINE

Tinnawat Chaisamlitpol
Tanawat Songsana
Tanatip Viriyartanasite
Panadda Seangwong

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERRING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

.....

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษาและพัฒนาการควบคุมการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

STUDY OF DEVELOPMENTATION AND CONTROL

ELECTRICITY GENERATION BY STIRLING ENGINE

นักศึกษาผู้จัดทำ

นายทินวัฒน์	ชัยสัมฤทธิ์ผล	**รหัสนักศึกษา**	53010592
นายธนวัฒน์	สงสะนะ	**รหัสนักศึกษา**	53010660
นายธนาธิป	วิริยะธนสิทธิ์	**รหัสนักศึกษา**	53010677
นางสาวปนัดดา	เชี่ยงหว็อง	**รหัสนักศึกษา**	53010915

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

ปีการศึกษา 2556

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.สาท คำมูล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาและพัฒนาการควบคุมการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์สเตอร์ลิง STUDY OF DEVELOPMENTATION AND CONTROL ELECTRICITY GENERATION BY STIRLING ENGINE			
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายทินวัฒน์	ชัยสัมฤทธิ์ผล	**รหัสนักศึกษา**	53010592
	นายธนวัฒน์	สงสะนะ	**รหัสนักศึกษา**	53010660
	นายธนาธิป	วิริยะธนสิทธิ์	**รหัสนักศึกษา**	53010677
	นางสาวปนัดดา	เชี่ยงหว็อง	**รหัสนักศึกษา**	53010915
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.สาท	คำมูล		
ปีการศึกษา	2556			

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับการนำพลังงานความร้อนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ จากการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟา ที่มีหลักการทำงานของความต่างอุณหภูมิสูง-ต่ำฝั่งด้านร้อนและเย็น ในการขับเคลื่อนของลูกสูบทั้งสองด้านด้านร้อนและด้านเย็น ให้เกิดการทำงานโดยเป็นกระบวนการรับความร้อนเข้ามาแล้วมาได้ผลออกมาเป็นพลังงานกล ซึ่งเห็นว่าพลังงานกลที่ได้มาจากความร้อนนั้นสารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่างๆได้ จึงนำไดนาโมมาทำงานร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยอาศัยผลลัพธ์ทางกลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงไปปั่นไดนาโมให้เกิดผลลัพธ์ทางผลทางไฟฟ้า ซึ่งพบว่าการทดลองวัดแรงบิดความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้าให้ผลลัพธ์ที่น้อยกว่าที่ได้คาดหวังไว้ เพราะเนื่องจากจากเครื่องสเตอร์ลิงแอลฟาทรงตัววี เป็นตัวต้นแบบ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแอลฟาทรงตัววี นี้จะได้ผลลัพธ์และประสิทธิภาพที่ดีต้องมีการพัฒนาตัวเครื่องเป็นลำดับไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	STUDY AND DEVELOPMENT CONTROL ELECTRICITY BY STIRLING ENGINE	
Authors	Mr. Tinnawat	Chaisamlitpol
	Mr. Tanawat	Songsana
	Mr. Tanatip	Viriyartanasite
	Miss Panadda	Seangwong
Thesis Advisor	Asst. Prof. Sart	Kummool
Year	2013	

ABSTRACT

This thesis presents about delivering thermal energy to good use. From creating an alpha stirling engine. The working principle of different temperatures hot and cold side. Both sides of the piston to drive the hot side and the cold side work by a process of heating and the results of output to mechanical energy. Which suggests that mechanical energy is derived from heat a substance that can be used to benefit. Use output of working with the stirling to spin the dynamo. It get the results of output to the electrical. It was found that the experimental torque speed and voltage, the results were less than expected. Because of alpha Sterling Type V is a prototype. This alpha stirling engine Type V will get the good results and performance. This engine must be developed further.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความสนับสนุนจาก ผศ.สาท คำมูล ที่ได้ให้คำแนะนำ คุณยุท สงสะนะ ที่ช่วยให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการทำเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพร้อมช่วยในการปรับปรุงแก้ไขตลอดเวลา ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ช่วยให้คำชี้แนะเกี่ยวกับการทดลองเครื่องยนต์ ให้ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับระบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมากขึ้น อีกทั้งได้อนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์การทำโครงงาน และคุณสมพงษ์ กลิ่นหอม ที่ช่วยจัดหาอุปกรณ์การทดลองเครื่องยนต์รวมไปทั้งให้คำแนะนำการทำโครงงานตลอดเวลา ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณมาใน ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญภาพ.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....2

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....4

2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....4

2.1.1 ส่วนประกอบสำคัญ.....4

2.1.1.1 แหล่งความร้อน.....4

2.1.1.2 เครื่องทำความร้อน.....5

2.1.1.3 รีเจนเนอเรเตอร์.....5

2.1.1.4 เครื่องทำความเย็น.....5

2.1.1.5 ตัวระบายความร้อน.....6

2.2 รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....6

2.2.1 ลักษณะของเครื่องยนต์.....6

2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงประเภทแอลฟา.....8

2.4 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....9

2.4.1 วัฏจักรสเตอร์ลิง.....10

2.4.2 การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของวัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ....15
2.5 ประสิทธิภาพความร้อน....16
2.4.1 ประสิทธิภาพ Carnot....16
2.6 การสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในระบบ....17
2.6.1 การสูญเสีย Adlabatlc....17
2.6.2 การสูญเสียฮีสเจอรีซิส....17
2.6.3 การสูญเสียช่องว่าง Appemdlx....17
2.6.4 แรงต้านทกหรือการสูญเสีย Windage....17
2.6.5 การสูญเสียรั่วไหล....18
2.7 การนำความร้อน....18
2.8 การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง....18
2.8.1 วัสดุสำหรับกระบอกสูบ....19
2.8.2 ซีล....20
2.9 สัดส่วนการอัด....20
2.10 พัฒนาการของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง....21
2.10.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในยุคแรก....21
2.10.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในยุคสอง....21
2.10.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์....21
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....22
2.12 การประยุกต์ใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิง....22
2.12.1 การประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน....22
2.12.2 การประยุกต์ใช้ในอนาคต....24
2.13 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า....24

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง....26
3.1 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์....26
3.1.1 เสื้อสูบ....26
3.1.2 กระบอกสูบรับความร้อน....27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3 ลูกสูบ....27
3.1.4 ล้อตุนกำลัง....28
3.1.5 ข้อเหวี่ยงและก้านสูบ....28
3.1.6 รีเจนเนอร์เรเตอร์....29
3.1.7 ตัวเครื่องสเตอร์ลิง....29
3.1.8 ห้องเผาเชื้อเพลิง....30
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง....31
3.2.1 เครื่องวัดรอบ....31
3.2.2 อุปกรณ์วัดแรงบิดด้วยตาชั่งสปริงแบบดิจิตอล....32
3.2.3 แหล่งความร้อน....33
3.2.4 นาฬิกาจับเวลา....33
3.2.5 อุปกรณ์ถ่วงน้ำหนัก....33
3.3 วิธีการทดลองหาแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง....34
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง....35
3.4.1 เครื่องวัดรอบ....35
3.4.2 มัลติมิเตอร์....35
3.4.3 สายพาน....35
3.4.4 ไดนาโม....36
3.4.5 เครื่องวัดอุณหภูมิ....36
3.4.6 นาฬิกาจับเวลา....37
3.5 วิธีการทดลองหาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง....37

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล....39
4.1 ตารางการทดลอง....39
4.1.1 ตารางบันทึกผลการหาแรงบิด....39
4.1.2 ตารางบันทึกผลของเวลา ความเร็วรอบ อุณหภูมิฝั่งร้อน อุณหภูมิฝั่งเย็น....40
4.2 กราฟการทดลอง....40
4.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา....40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2 กราฟแสดงอุณหภูมิฝั่งร้อนและฝั่งเย็น เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการทดลอง.....41
4.2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ.....41
4.2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบ.....41
4.2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความเร็วรอบ.....42

บทที่ 5 สรุปผล วิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....43
5.1 วิจารณ์ผลการทดลอง.....43
5.2 สรุปผล.....43
5.3 ปัญหาที่พบเจอ.....43
5.4 สิ่งที่ควรปรับปรุง.....43
5.5 ข้อเสนอแนะ.....44

บรรณานุกรม.....45

ภาคผนวก.....46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ.....30

4.1.1 ตารางบันทึกผลการหาแรงบิด.....39

4.1.2 ตารางบันทึกผลของเวลา ความเร็วรอบ อุณหภูมิฝั่งร้อน อุณหภูมิฝั่งเย็นและแรงดันไฟฟ้า.....40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.2.1	เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทั้งสามรูปแบบ	8
2.3	เครื่องยนต์สเตอร์ลิงประเภทแอลฟา	9
2.4	ส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	10
2.4.1	รูปแสดงการเปรียบเทียบระหว่างวัฏจักรสเตอร์ลิงกับวัฏจักรคาร์โนท์	11
2.4.2	(ก.) ตำแหน่งลูกสูบในกระบวนการ Isothermal Expansion	12
2.4.2	(ข.) ตำแหน่งลูกสูบในกระบวนการ Constant Volume Cooling	13
2.4.2	(ค.) ตำแหน่งลูกสูบในกระบวนการ Isothermal Compression	13
2.4.2	(ง.) ตำแหน่งลูกสูบในกระบวนการ Constant Volume Heating	13
2.4.3	กราฟ PV ของวัฏจักรสเตอร์ลิง	14
2.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Beale number กับอุณหภูมิด้านร้อน	19
2.13.1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	25
2.13.2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	25
3.1	เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาทรงตัววี	26
3.1.1	เสื้อสูบ	27
3.1.2	กระบอกสูบรับความร้อน	27
3.1.3	ลูกสูบ	28
3.1.4	ล้อตุนกำลัง	28
3.1.5	ก้านสูบและข้อเหวี่ยง	29
3.1.6	รีเจนเนอร์เรเตอร์	29
3.1.7	ตัวเครื่องครื่องสเตอร์ลิง	30
3.1.8	ห้องเผาเชื้อเพลิง	30
3.2.1	เครื่องวัดรอบ	32
3.2.2	อุปกรณ์วัดแรงบิดและวิธีการวัดแรงบิด	32
3.2.3	แหล่งความร้อน	33
3.2.5	อุปกรณ์ถ่วงน้ำหนัก	33
3.31	ติดตั้งเครื่องกับชุดทดลอง	34
3.3.2	ใช้เครื่องวัดความเร็วรอบกับล้อตุนกำลัง	34
3.3.3	การทดลองหาแรงบิด	35
3.4.1	มัลติมิเตอร์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.4.2	สายพาน	36
3.4.3	ไดนาโม	36
3.4.4	เครื่องวัดอุณหภูมิ	36
3.5.1	เตรียมชุดการทดลองแรงดันไฟฟ้า	37
3.5.2	วัดอุณหภูมิ	37
3.5.3	วัดความเร็วรอบ	38
3.5.4	วัดแรงดันไฟฟ้า	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ปัจจุบันได้มีการรณรงค์มาใส่ใจกับสภาพสิ่งแวดล้อมกันมากขึ้น มีการจัดโครงงานอนุรักษ์ต่างๆขึ้นอยู่มากมาย เพื่อให้เห็นประโยชน์ของธรรมชาติว่ามีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์อย่างไร นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำพลังงานจากธรรมชาติมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนได้อีกด้วย สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling Engine) เป็นการนำพลังงานความร้อนมาสร้างเป็นพลังงานกล ซึ่งพลังงานความร้อนจะมาจากแหล่งใดๆก็ได้ที่มีอุณหภูมิความร้อนอย่างเพียงพอที่จะไปขับเคลื่อนลูกสูบให้มีการเคลื่อนที่ จากนี้แล้วพลังงานกลที่ได้ก็สามารถนำมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนจำพวกถ่านหิน ปิโตรเลียมได้

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ความร้อน (hot engine) ชนิดหนึ่ง ซึ่งทำงานแบบระบบปิดตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์เมื่อได้รับความร้อนจากภายนอก ทำให้แก๊สในระบบมีการเปลี่ยนแบบอุณหภูมิ และเกิดวัฏจักรการอัดและขยายตัวของแก๊สในระบบ การไหลของแก๊สภายในระบบถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรลูกสูบ ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกล หรือในทางกลับกัน จากหลักการนี้ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งใดก็ได้เพื่อขับเคลื่อนเครื่องยนต์ ตัวอย่างเช่นพลังงานความร้อนจากการรวมแสงอาทิตย์ การเผาขยะต่างๆ ความร้อนที่ถูกทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือเชื้อเพลิงอื่น ๆ อีกมากมาย เป็นต้น

ช่วงแรกของการปฏิวัติอุตสาหกรรมเกิดปัญหาเครื่องยนต์ไอน้ำ (Steam Engine) เกิดการระเบิดนั้น เป็นปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นเสมอ ทำให้มีผู้คนบาดเจ็บและล้มตายเป็นจำนวนมาก เนื่องจากในสมัยนั้น ความรู้ด้านวัสดุศาสตร์ยังดีไม่พอ ซึ่งจากปัญหานี้ ในปี ค.ศ. 1816 โรเบิร์ต สเตอร์ลิง (Robert Stirling) ได้ประดิษฐ์สิ่งที่เรียกว่า “A New Type of Hot Air Engine with Economier” ซึ่งเครื่องยนต์ชนิดนี้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และเป็นทางเลือกใหม่แทนเครื่องจักรไอน้ำซึ่งสามารถแก้ปัญหาการระเบิดของเครื่องยนต์ได้ และเครื่องยนต์ประเภทนี้ใช้เชื้อเพลิงน้อย และให้พลังงานมากกว่าเครื่องยนต์ไอน้ำอื่นๆ ในยุคนั้นอีกด้วย และจากนั้นได้มีผู้นำไปพัฒนาต่อ ซึ่งปัญหาที่พบมากที่สุดในยุคนั้นคือ วัสดุที่นำมาใช้สร้างเครื่องยนต์นั้นเอง เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้น ด้านฝั่งร้อนของเครื่องยนต์ (hot end) จะถูกให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อนและยังคงรักษาอุณหภูมินั้นไว้ ทำให้วัสดุนั้นไม่สามารถเย็นลงในช่วงเวลาระหว่างการเดินเครื่อง ในช่วงแรกที่ โรเบิร์ต สเตอร์ลิง ได้สร้างเครื่องยนต์เครื่องแรกขึ้นมานั้น วัสดุจะมีเพียงแค่เหล็กหล่อ (cast iron) เท่านั้น และเมื่อด้านร้อนของเหล็กหล่อถูกทำให้ร้อนจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (Ozidize) อย่างรวดเร็ว ผลคือ ทำให้เกิดรูไหม้บนเหล็กหล่อซึ่งจะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง เนื่องจากเกิดการรั่วเป็นสาเหตุทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำ แต่เครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตอร์ลิงบางส่วนก็ถูกนำไปใช้ในการเดินเครื่องกลเล็กๆ (small machines) ปั๊ม (pump) และหมุนพัดลม (fan) จนกระทั่งในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 ได้มีการสร้างเครื่องยนต์ แก๊สโซลีน และเครื่องยนต์ดีเซล และปลายศตวรรษที่ 19 มอเตอร์ไฟฟ้าได้ถูกสร้างขึ้น มีการพัฒนาทั้งเครื่องยนต์สันดาปภายในและมอเตอร์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว รวมถึงทั้งสองอย่างมีกำลังงานมากกว่าเครื่องจักรไอน้ำและเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อมีขนาดเท่ากัน ทำให้การพัฒนาของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้หยุดลง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีเป็นเครื่องยนต์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และสามารถผลิตได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในแบบลูกสูบ ในกรณีที่มีการผลิตจำนวนมากจะมีราคาที่ถูก สำหรับประเทศที่กำลังพัฒนาสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานต้นทุนต่ำได้และมีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ถึงแม้ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมีประสิทธิภาพต่ำ หากแต่มีความปลอดภัยสูงและราคาถูก เหตุผลนี้ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิง เป็นเครื่องยนต์ในการที่จะนำมาพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อเป็นเครื่องยนต์อีกทางเลือกหนึ่งในอนาคต

เนื่องจากการเรียนการสอนในสาขาวิศวกรรมศาสตร์นั้น วิชาเทอร์โมไดนามิกส์เป็นวิชาพื้นฐานวิชาหนึ่งที่ต้องเรียน ซึ่งเนื้อหาส่วนหนึ่งจะเรียนเกี่ยวกับวัฏจักรพื้นฐานทางความร้อนวัฏจักรหนึ่งแต่โดยทั่วไปแล้วส่วนใหญ่จะเรียนกันในทางทฤษฎีเท่านั้น ทำให้ผู้เรียนไม่สามารถมองเห็นภาพได้และไม่เข้าใจในวัฏจักรสเตอร์ลิงอย่างลึกซึ้ง ทำให้ผู้เรียนขาดความสนใจ ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาทั้งทฤษฎีและปฏิบัติทำการสร้างเป็นเครื่องต้นแบบสเตอร์ลิงขึ้นมาเพื่อศึกษาหลักการทำงานและความสัมพันธ์ของค่าต่างๆที่เกิดขึ้นและนำความรู้ที่ได้ไปต่อยอด พัฒนาเครื่องยนต์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับหลักการทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
2. เพื่อทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
3. เพื่อทำการทดลองหาความสัมพันธ์การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับแรงดันไฟฟ้า
4. เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อไป

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. รู้และเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
2. สามารถทดลองหาผลของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ การทำงานเครื่องยนต์ และแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าออกมาได้
3. เป็นต้นแบบในการพัฒนา

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาประวัติและวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาและวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อให้ทราบถึงหลักการทำงานของเครื่องยนต์และเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาพัฒนาเป็นเครื่องต้นแบบ

2. ศึกษาประเภทของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ทำการศึกษาประเภทของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อมาวิเคราะห์ว่าควรนำเอาประเภทไหนมาทำเป็นเครื่องต้นแบบ

3. ศึกษาส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ทำการศึกษาส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อนำไปทำการผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและทำเป็นเครื่องต้นแบบ

4. ศึกษาหลักการทำงานและวัฏจักรของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ทำการศึกษาหลักการทำงานและวัฏจักรของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากกฎของเทอร์โมไดนามิกส์และหลักการอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

5. ติดตั้งเครื่องมือวัดและทำการทดลองวัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

ทำการเลือกชนิดของเครื่องมือวัดและเลือกขนาดของเครื่องมือวัดเพื่อวัดค่าต่างๆที่ได้จากการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้
2. สามารถวิเคราะห์ผลจากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการทำงาเครื่องยนต์และแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าออกมาได้
3. สามารถนำไปเป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ถูกคิดค้นและจดสิทธิบัตรโดย Robert Stirling ในปีคริสศักราช 1816 เครื่องยนต์ความร้อนที่ทำงานโดยกระบอกสูบขยายตัวและกระบอกสูบบีบตัวของอากาศหรือแก๊ส การไหลของของไหลในอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะเปลี่ยนจากพลังงานความร้อนมาเป็นพลังงานกล ยิ่งกว่านั้นแล้วเป็นเครื่องยนต์ที่ทำงานแบบระบบปิดโดยอาศัยการไหลวนของแก๊สตามหลักการของระบบเทอร์โมไดนามิกส์ การทำงานรีเจนเนอเรทีฟจะช่วยอธิบายเกี่ยวกับแต่ละประเภทขอเครื่องยนต์และการเก็บสะสมความร้อนของตัวรีเจนเนอเรเตอร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแต่ละระบบปิดของพลังงานความร้อน

แก๊สที่ใช้อัดสามารถเป็นได้ทั้ง อากาศ ไฮโดรเจน ฮีเลียม ไนโตรเจน หรือ ไอ ซึ่งยังขึ้นอยู่กับการออกแบบของเครื่องยนต์ ต้นกำเนิดของความร้อนสามารถมาจากหลายๆแหล่งกำเนิดซึ่งนำมาใช้เป็นพลังงานของเครื่องยนต์ได้ เช่น แหล่งกำเนิดที่มาจากถ่านหินเป็นน้ำมัน และพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะต้องมีการปรับเปลี่ยนแหล่งกำเนิดความร้อนให้เข้ากับตัวเครื่อง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถูกคิดค้นให้เป็นทางเลือกที่มีความปลอดภัยมากกว่าเครื่องยนต์ไอน้ำ เมื่อ เครื่องยนต์ไอน้ำมีคุณภาพไม่ดี และมีการระเบิดบ่อยครั้ง เนื่องจากมีความดันสูงทำให้ไม่สามารถควบคุม ได้เท่าที่ควร และเป็นเทคโนโลยีที่ล้าสมัยแล้ว เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นที่นิยมอย่างมาก

2.1.1 ส่วนประกอบสำคัญ

สิ่งสำคัญสำหรับการทำงานแบบระบบปิด การที่จะใช้พลังงานความร้อนขับเคลื่อนนั้นต้องส่งผ่านแหล่งความร้อนไปให้ของไหลมีการทำงานไปยังตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและตัวระบายความร้อน ระบบการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นต้องมีแหล่งจ่ายความร้อนหนึ่งแห่ง มีตัวระบายความร้อนหนึ่งถึงห้าแห่ง ขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องยนต์

2.1.1.1 แหล่งความร้อน

แหล่งความร้อนอาจได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง และการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนี้จะไม่ไปรวมกับสารทำงาน ฉะนั้น จะไม่มีการสัมผัสกับอุปกรณ์ภายในของเครื่องยนต์เลย เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถทำงานกับเชื้อเพลิงที่อันตรายต่อเครื่องยนต์ชนิดอื่นได้ เช่น landfill gas ที่ประกอบไปด้วย siloxane แหล่งพลังงานความร้อนที่เหมาะสม ประกอบไปด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้ผิวโลก พลังงานนิวเคลียร์ พลังงานจากของเสีย และพลังงานชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 เครื่องทำความร้อน

ในเครื่องยนต์ขนาดเล็กจะประกอบไปด้วยกำแพงกั้นในพื้นที่ฝั่งความร้อน แต่สำหรับเครื่องยนต์ขนาดใหญ่นั้นต้องการพื้นที่หน้าสัมผัสขนาดใหญ่ไว้สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างไว้พอเพียง โดยทั่วไปแล้ว จะมีครีบอยู่ภายในและภายนอก หรือท่อรูเล็กๆหลายๆรูไว้ การออกแบบในส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ คือ ความสมดุลระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อน กับ การสูญเสียการสูบฉีดความหนืด และ low dead space ในการทำงานที่กำลังและมีแรงดันสูง ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นทางด้านฝั่งความร้อนต้องสร้างมาจากอัลลอย เพราะมีความคงทนต่ออุณหภูมิที่สูงและไม่เป็นสนิม

2.1.1.3 รีเจนเนอเรเตอร์

ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง รีเจนเนอเรเตอร์นี้เป็นส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน และเป็นที่กักเก็บอุณหภูมิความร้อนระหว่างพื้นที่ความร้อนและเย็น หรือเป็นที่ผ่านของของไหลโดยตรงเป็นอย่างแรก มันจะกักเก็บระบบความร้อนที่แลกเปลี่ยนกับอุณหภูมิแวดล้อมเป็นตัวคั่นกลางระหว่างการหมุนเวียนของอุณหภูมิสูงสุดกับต่ำสุด จึงทำให้เกิดประสิทธิภาพเชิงความร้อน Carnot ที่ถูกกำหนดด้วยอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด

ผลกระทบอย่างแรกในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยการหมุนเวียนอุณหภูมิความร้อนและอื่นๆที่ผ่านเครื่องยนต์อย่างถาวร ผลกระทบขั้นต่อมาคือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้นทำให้ได้กำลังที่สูงขึ้นจากการแลกเปลี่ยนความร้อน แต่มันมีข้อจำกัดของเครื่อง คือในทางปฏิบัติแล้วการที่กำลังเพิ่มมากขึ้นนั้นอาจหมายถึงการเพิ่มขึ้นของ dead space และ การสูญเสียการสูบฉีด ที่เกิดในรีเจนเนอเรเตอร์ที่จะลดประสิทธิภาพจากการฟื้นฟู

สิ่งท้าทายของการออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์คือการที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนให้เพียงพอโดยไม่ต้องมีเกิด dead space หรือ เกิดความต้านทานการไหล ความขัดแย้งของการออกแบบนี้ เป็นหนึ่งในสิ่งที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติที่เป็นข้อกำหนดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยทั่วไปแล้วจะออกแบบให้มีตาข่ายลวดโลหะที่มีความพรุน มีลวดแกนตั้งฉากการไหลของก๊าซ เพื่อที่จะลดการไหลและเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

2.1.1.4 เครื่องทำความเย็น

ในเครื่องยนต์ขนาดเล็กจะมีสิ่งนี้เป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่มีกำแพงด้านพื้นที่เย็น แต่ในที่มีกำลังขนาดใหญ่จะใช้น้ำเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

2.1.1.5 ตัวระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ในกรณีที่เป็นพลังงานขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ตัวนำความร้อนจะแลกเปลี่ยนความร้อนจากพลังงานไปยังอากาศล้อมรอบพลังงานที่ใช้ทางทะเลสามารถใช้อุณหภูมิน้ำล้อมรอบได้ ในกรณีที่มีความร้อนมารวมตัวกันและระบบพลังงานนั้น น้ำที่ใช้นี้เป็นสิ่งที่ถูกนำมาใช้โดยตรงหรือทางอ้อมในการให้ความร้อน หรืออาจจะทำงานที่อุณหภูมิห้องแล้วใช้ตัวระบายความร้อนรักษาไว้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าโดยใช้ไนโตรเจนหรือน้ำเย็น

2.2 รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องจักรที่ทำงานตามทฤษฎีวัฏจักรสเตอร์ลิง หรือทฤษฎีที่พัฒนาแล้ว โดยมีสารทำงาน (working fluid) ที่เป็นของไหลที่อัดตัวได้ (compressible fluid) เช่น อากาศ ไฮโดรเจน ฮีเลียม ไนโตรเจน หรือไอน้ำ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นให้ประสิทธิภาพสูง โดยมีมลพิษต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน เครื่องยนต์ในยุคแรกนั้นมีขนาดใหญ่แต่ประสิทธิภาพต่ำ อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ผ่านมานั้น ได้มีเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจำนวนไม่น้อย ถูกพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอก (external combustion engine) ออกแบบและสร้างได้ง่าย เครื่องยนต์รุ่นใหม่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์ในยุคแรกมาก และสามารถใช้แหล่งความร้อนสูงจากแหล่งใดก็ได้เพื่อเป็นแหล่งพลังงาน ได้แก่ วัสดุที่ติดไฟได้ ขยะจากพืชผลทางการเกษตร แก๊สชีวมวล และพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะต้องมีการปรับเปลี่ยนแหล่งกำเนิดความร้อนให้เข้ากับตัวเครื่อง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบและจะเหมาะสมเมื่อ

1). ต้องการใช้กับเชื้อเพลิงหลากหลายคุณภาพ
2). เครื่องยนต์ต้องการการระบายความร้อนที่ดี
3). ต้องการการทำงานที่เงียบ
4). ต้องการเครื่องยนต์ที่มีความเร็วรอบต่ำ
5). ต้องการเครื่องยนต์มีกำลังงานคงที่
6). ต้องการเครื่องยนต์มีการเปลี่ยนแปลงกำลังงานที่ช้า
7). เครื่องยนต์ต้องการเวลาอุ่นเครื่องนาน

2.2.1 ลักษณะของเครื่องยนต์

ชิ้นส่วนเครื่องต่างๆ ได้ถูกประกอบรวมกันเพื่อให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถทำงานได้ตามวัฏจักรสเตอร์ลิง ซึ่งวัฏจักรสเตอร์ลิงประกอบด้วย กระบวนปริมาตรคงที่ ขณะที่มีการไหลของสารทำงานระหว่างส่วนร้อนเย็น และกระบวนการอุณหภูมิคงที่ ขณะที่มีการรับความร้อนและคายความร้อน ในช่วงที่มีการอัดละขยายตัว กระบวนการอัดและขยายตัวนี้จะเกิดในกระบอกสูบที่มีลูกสูบ

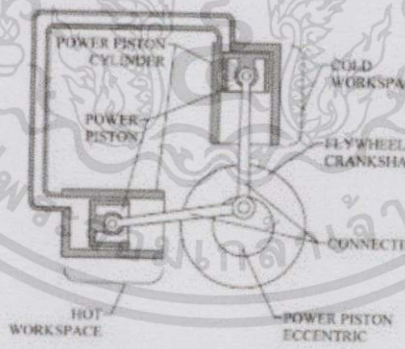
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(power piston) ส่วนลูกสูบดันแก๊ส (displacer) จะผลักดันแก๊สให้เคลื่อนที่ไปและกลับระหว่าง ส่วนร้อนรีเจเนเรเตอร์ และส่วนเย็นที่ปริมาตรคงที่ดังรูปที่ เมื่อดิสเพลสเซอร์เคลื่อนที่ไปยังส่วนเย็น จะดันแก๊สจากส่วนเย็นให้ไหลไปยังส่วนร้อนและเป็นเช่นนี้ในทางกลับกัน ลักษณะของเครื่องยนต์ต่างๆ นั้นมีชื่อว่า แอลฟา (alpha) เบต้า (beta) และแกมม่า (gamma) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กัน มีวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกที่เหมือนกัน แต่มีการออกแบบที่แตกต่างกัน

1). แบบแอลฟา (alpha) ไม่มีดิสเพลสเซอร์ แต่เป็นสองลูกสูบ ซึ่งเรียกว่า ลูกสูบร้อนและเย็น ลูกสูบเหล่านี้มีการเคลื่อนที่ในลักษณะที่ทำให้มีปริมาตรในระบบคงที่ เมื่อสารทำงานทั้งหมดถูกดันให้อยู่ในกระบอกสูบเดียว ลูกสูบหนึ่งจะหยุด และอีกลูกหนึ่งจะเคลื่อนที่ขยายหรืออัดสารทำงาน งานได้จากการขยายตัวที่ลูกสูบร้อน

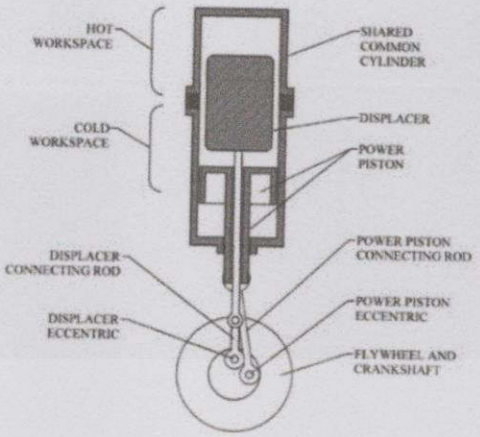
2). แบบเบต้า (beta) มีดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังในกระบอกเดียวกัน ดิสเพลสเซอร์จะดันสารทำงานระหว่างส่วนร้อนและเย็นของกระบอกสูบให้ผ่าน ฮีทเตอร์ รีเจเนเรเตอร์และคูลเลอร์ ลูกสูบเย็นอยู่ในส่วนเย็นของกระบอกสูบ ทำหน้าที่อัดสารทำงานเมื่อสารทำงานอยู่ในส่วนเย็น และขยายตัวเมื่อสารทำงานเคลื่อนที่ไปยังส่วนร้อน

3). แบบแกมม่า (gamma) มีกระบอกสูบแยกกันสำหรับดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง โดยทั้งสองกระบอกสูบเชื่อมต่อถึงกันและมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเบต้า รูปแบบแกมม่าที่มีการส่งกำลังจากทั้งสองลูกสูบไปที่เพลาข้อเหวี่ยงเดียวกัน มีประสิทธิภาพทางกลที่สูงที่สุดในเชิงทฤษฎี อย่างไรก็ตามกระบอกสูบควรออกแบบให้อยู่ในแนวตั้ง เพื่อลดแรงเสียดทาน

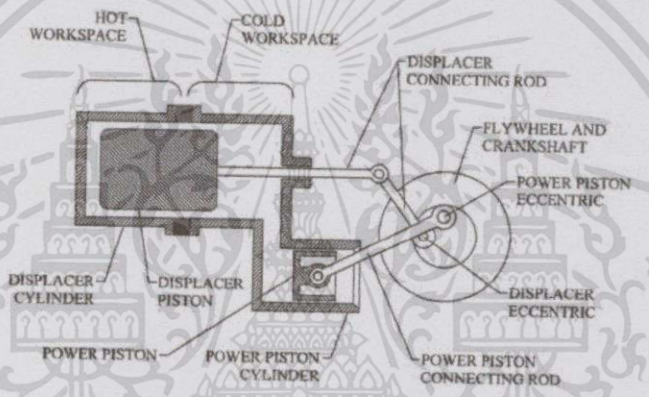


The Alpha-Configuration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The Bet Configuration



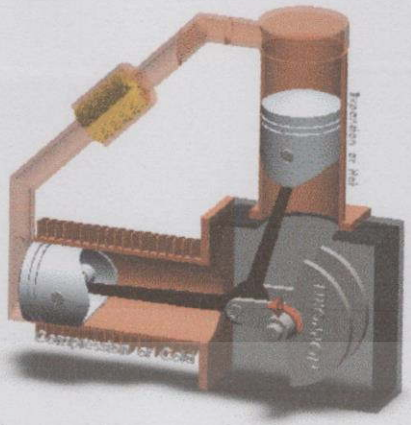
The Gamma-Configuration

รูปที่ 2.2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทั้งสามรูปแบบ

2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงประเภทแอลฟา

เครื่องยนต์ประเภทนี้ประกอบไปด้วยกระบอกสูบกำลัง 2 กระบอกสูบ หนึ่งคือฝั่งร้อน อีกหนึ่งคือฝั่งเย็น ที่กระบอกสูบฝั่งร้อนภายในนั้นเป็นที่สำหรับอุณหภูมิสูง ส่วนฝั่งกระบอกสูบเย็นภายในนั้นเป็นที่สำหรับอุณหภูมิต่ำ เครื่องยนต์ประเภทนี้มีอัตรากำลังที่สูง แต่จะมีปัญหาทางด้านเทคนิคในลูกสูบด้านร้อนกับการรั่วเมื่อมีอุณหภูมิสูง ในทางปฏิบัติแล้วลูกสูบนี้จะมีขนาดใหญ่เพื่อกันการรั่วจากทางฝั่งความร้อนที่จะรั่วไปยังพื้นที่อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



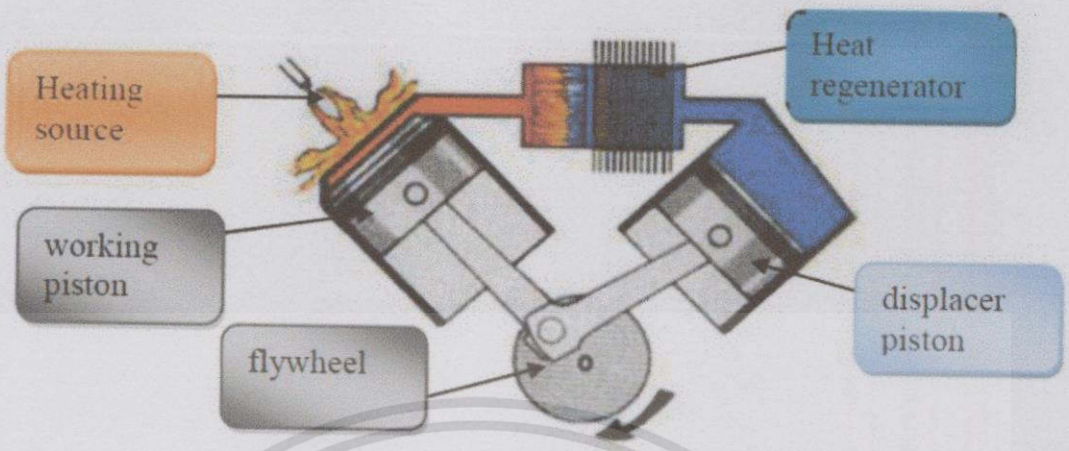
รูปที่ 2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงประเภทแอลฟา

2.4 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิง นั้นจะประกอบด้วยกระบอกสูบ ลูกสูบ และ ลูกสูบไล่ ส่วนรีเจนเนอร์เรเตอร์ และล้อตุนกำลังเป็นส่วนอิสระอื่น ๆ ของเครื่องยนต์ เมื่อความร้อนส่วนหนึ่งของกระบอกสูบมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นโดยแหล่งความร้อนภายนอกอุณหภูมิสูงขึ้น และก๊าซเกิดการขยายตัวซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิของด้านฝั่งความร้อน ปริมาณรวมจะมีค่าคงที่ และถูกจำกัดด้วยลูกสูบทำให้ก๊าซเกิดการขยายตัวผลักดันให้ลูกสูบลง ดังนั้นปริมาณความดันของก๊าซที่เพิ่มขึ้น ก๊าซจะสูญเสียความดันและอุณหภูมิ เมื่อลูกสูบดันกลับไปทางด้านหลังที่ฝั่งความร้อน และถูกบีบอัดก๊าซโดยแรงโมเมนตัมของล้อตุนกำลัง เมื่อมันมาถึงใกล้ถึงขีดจำกัดลูกสูบไล่ยังคงดันให้ก๊าซระบายไปทางด้านความร้อนของกระบอกสูบเพื่อให้ก๊าซถูกบีบอัด และสามารถเตรียมที่จะทำแบบเดิมอีกรอบ ก๊าซขยายตัวและดันให้ลูกสูบลงอีกครั้งซึ่งจะผลิตเป็นพลังงานกลสำหรับการใช้งาน รอบหมุนนี้จะดำเนินต่อไปจนกว่าแหล่งความร้อนภายนอกสามารถใช้ได้

ล้อตุนกำลังและรีเจนเนอร์เรเตอร์มีหน้าที่สำคัญในการทำงานของเครื่องยนต์ ล้อตุนกำลังได้ทำการแปลงการเคลื่อนที่เชิงเส้นการทำงานของลูกสูบเป็นการเคลื่อนที่แบบหมุน ซึ่งจะช่วยให้แรงโมเมนตัมสำหรับขั้นตอนการหมุน รีเจนเนอร์เรเตอร์ใช้ความร้อนจากก๊าซในขั้นตอนการขยายตัวและปล่อยความร้อนไปใช้ก๊าซในขั้นตอนการบีบอัด เพื่อทำให้ประสิทธิภาพเครื่องยนต์มีมากเครื่องยนต์สเตอร์ลิง และส่วนประกอบจะแสดงในรูปด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

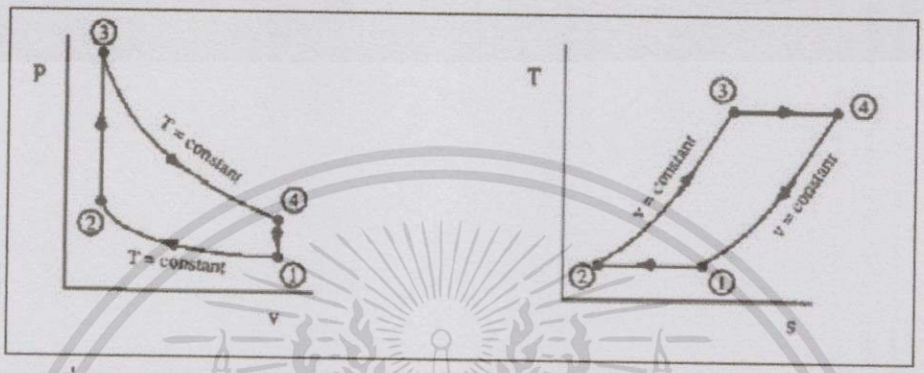
2.4.1 วัฏจักรสเตอร์ลิงค์

วัฏจักรสเตอร์ลิงค์ทางอุดมคติมีสิ่งที่น่าสนใจสามข้อคือ ข้อแรก ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรที่มีรีเจนเนอร์เรเตอร์แบบอุดมคติ มีค่าเท่ากับวัฏจักรคาร์โนท์ ในขณะที่มีการถ่ายเทสารทำงานผ่านรีเจนเนอร์เรเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เก็บความร้อนชั่วคราว จะดูดซับและคายความร้อนให้แก่สารทำ งาน ดังนั้นจะทำให้มีการรับพลังงานจากภายนอกลดลง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนดังรูป

ข้อสอง ตามวัฏจักรคาร์โนท์ ถ้าแทนกระบวนการไอเซนโทรปิคสองกระบวนการ (two isentropic processes) ด้วยกระบวนการปริมาตรคงที่สองกระบวนการ (two constant-volume processes) จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ V-P ซึ่งทำงานจากวัฏจักรสเตอร์ลิงจะเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องใช้ความดันสูงและปริมาตรกวาด (swept volume) มากเหมือนกับวัฏจักรคาร์โนท์ จากรูป 2.4.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวัฏจักรสเตอร์ลิงกับคาร์โนท์ ในช่วง ความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิเดียวกัน พื้นที่แรงเงา 2C-2-3 และ 4C-4-1 เป็นพื้นที่ที่พื้นขึ้นจากการแทนกระบวนการ ไอเซนโทรปิคสองกระบวนการ (two isentropic processes) ด้วยกระบวนการปริมาตรคงที่สองกระบวนการ (two constant-volume processes) กระบวนการไอเซนโทรปิคของวัฏจักรคาร์โนท์ 1-2C และ 3-4C ถูกขยายออกไปเป็นกระบวนการ 1-2 และ 3-4 ทำให้ได้งานเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่สาม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แบบใช้ลูกสูบทั้งหมด โดยทำงานในขอบเขตอุณหภูมิเท่ากัน อัตราส่วนการอัดเท่ากันมีมวลของสารทำงานในทางอุดมคติเท่ากัน ความดันภายนอกระบบเท่ากัน และมีกลไกการทำงานที่เหมือนกัน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในทางอุดมคติจะมีประสิทธิภาพสูงทางกลสูงที่สุด ทั้งสามข้อนี้แสดงให้เห็นว่าในทางทฤษฎีเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถเทียบได้กับเครื่องยนต์ความร้อน (heat engine) ทุกประเภท



รูปที่ 2.4.1 รูปแสดงการเปรียบเทียบระหว่างวัฏจักรสเตอร์ลิงกับวัฏจักรคาร์โนท์

2.4.2 การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

กระบวนการการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 1-2 (สารทำงานถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่ำออกนอกระบบ) หลังจากที่ดิสเพลสเซอร์ดันสารทำงานเข้าสู่ส่วนเย็น จะอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน ดังรูป 2.4.1 ซึ่งสารทำงานจะถูกทำให้เย็น ที่สภาวะนี้เป็นสภาวะที่ 1 และมีความดันเป็น p_1 ลูกสูบกำลัง จะเริ่มเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่างไปยังศูนย์ตายบนโดยแรงเฉื่อยจากล้อตุนกำลัง (fly wheel) และแรงดูดที่เกิดจากสารทำงานเย็นตัวลง (vacuum) ทำให้สารทำงานถูกอัดจากสภาวะ 1 ไปยัง 2 เข้าใกล้ศูนย์ตายบน โดยที่มีอุณหภูมิคงที่ งานที่ให้แก่สารทำงานนี้คือพื้นที่ใต้กราฟของกระบวนการ 1-2

กระบวนการให้ความร้อนที่ปริมาตรคงที่ 2-3 (รีเจนเนอร์เรเตอร์ถ่ายเทความร้อนให้สารทำงาน) ดิสเพลสเซอร์กำลังเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบนไปยังศูนย์ตายล่าง และถ่ายเทสารทำงานจากส่วนเย็นมายังส่วนร้อน โดยที่ลูกสูบกำลังยังอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน เพื่อรอการเพิ่มความดันจากการขยายตัวของสารทำงาน และดิสเพลสเซอร์จะดันสารทำงานเข้าสู่ส่วนร้อนโดยผ่านรีเจนเนอร์เรเตอร์ ซึ่งได้เก็บความร้อนไว้ถูกถ่ายเทให้สารทำงาน ทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นจาก 2 ไปยัง 3 โดยมีปริมาตรคงที่

กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 3-4 (ความร้อนจากภายนอกระบบถ่ายเทให้สารทำงาน) หลังจากดิสเพลสเซอร์ได้ดันสารทำงานทั้งหมดไปยังส่วนร้อน และหยุดที่ตำแหน่งศูนย์ตายล่าง เพื่อให้ความดันในระบบเพิ่มถึงจุดสูงสุดเป็น p_4.ในขณะที่กระบวนการ ที่3-4 ยังอยู่ในส่วนร้อน ลูกสูบกำลังเริ่มเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบนไปยังศูนย์ตายล่าง จากความดันที่เพิ่มขึ้น และส่งกำลังไปยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้อตุนกำลัง (fly wheel) ทำให้ได้กำลังงาน ซึ่งกำลังงานจากจังหวะนี้ จะทำให้เกิดการทำงานจนครบวัฏจักร และงานในส่วนนี้หาได้จาก พื้นที่ใต้กราฟ 3-4

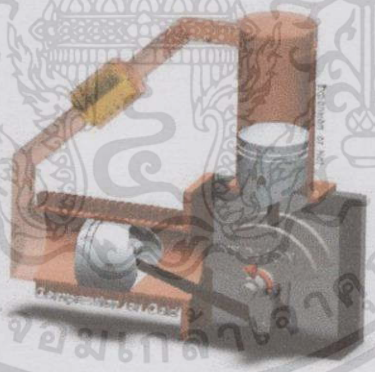
กระบวนการคายความร้อนที่ปริมาตรคงที่ 4-1 (สารทำงานถ่ายเทความร้อนให้รีเจเนอร์เรเตอร์) หลังจากที่ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ไปยังศูนย์ตายล่าง และส่งไปยังล้อตุนกำลัง (fly wheel) และแรงดูดจากความดันที่ลดลง ในขณะที่ดิสเพลสเซอร์กำลังเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่างไปยังศูนย์ตายบน และถ่ายเทสารทำงานไปสู่ส่วนเย็น โดยผ่านรีเจอเนอร์เรเตอร์ สารทำงานจึงถ่ายเทความร้อนให้รีเจนเนอร์เรเตอร์ ทำให้ความดันลดลงและเกิดแรงดูด ทำให้อุณหภูมิและความดันของสารทำงานลดลงจากสภาวะ 4 ไป 1 โดยปริมาตรคงที่

หลักการสำคัญคืออาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิที่จะไปเปลี่ยนแปลงความดันของแก๊สที่อยู่ในกระบอกสูบให้มีการเคลื่อนที่ของเพลา แล้วเกิดเป็นพลังงานกลขึ้น

วัฏจักรในอุดมคติประกอบด้วยสี่กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่หมุนวนเป็นวัฏจักรกระทำซ้ำๆไปเรื่อยๆ โดยตำแหน่งของลูกสูบแสดงตำแหน่งสิ้นสุดของแต่ละกระบวนการ

1. Isothermal Expansion

ลูกสูบรับความร้อนที่อุณหภูมิคงที่จากแหล่งจ่ายภายนอก เกิดการขยายตัวของความร้อนเกิดขึ้น ทำให้ลูกสูบร้อนเคลื่อนที่ ส่วนลูกสูบเย็นยังคงหยุดนิ่ง เพลาข้อเหวี่ยงอยู่ในช่วงการหมุนเปลี่ยนทิศทาง

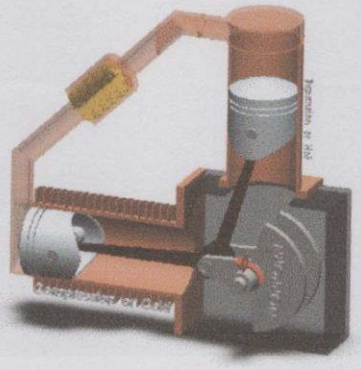


รูปที่ 2.4.2 (ก.) ตำแหน่งลูกสูบในกระบวนการ Isothermal Expansion

2. Constant Volume Cooling

ลูกสูบร้อนจะเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งสูงสุด ก๊าซที่อยู่ภายในจะถูกลูกสูบร้อนดันผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ไปยังลูกสูบเย็น ทำให้ลูกสูบเย็นมีการเคลื่อนที่

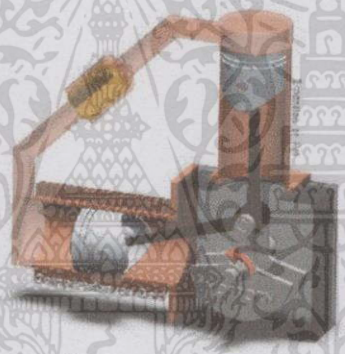
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4.2 (ข.) ตำแหน่งลูกสูบในกระบวนการ Constant Volume Cooling

3. Isothermal Compression

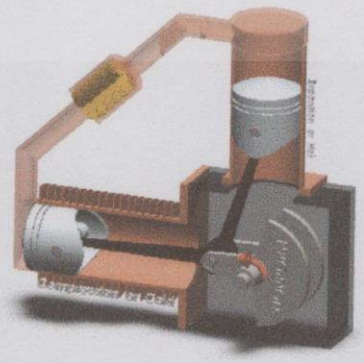
เป็นช่วงการอัดตัวพร้อมถ่ายเทความร้อนออกจากระบบ



รูปที่ 2.4.2 (ค.) ตำแหน่งลูกสูบในกระบวนการ Isothermal Compression

4. Constant Volume Heating

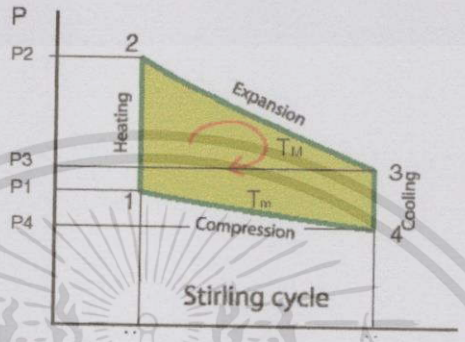
ลูกสูบเย็นจะเคลื่อนที่ลง ลูกสูบร้อนจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งสูงสุดเพื่อดูดก๊าซจากรีเจนเนอเรเตอร์เข้าสู่กระบอกสูบร้อน แล้วเข้าสู่วัฏจักรแรกต่อไป



รูปที่ 2.4.2 (ง.) ตำแหน่งลูกสูบในกระบวนการ Constant Volume Heating

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ วัฏจักรสเตอร์ลิงนี้จะเห็นว่าปริมาณจะคงที่อยู่ในขั้นตอนการให้ความร้อน (1-2) และขั้นตอนการทำความเย็น (3-4) ในขณะการขยายตัว (2-3) และขั้นตอนการบีบอัด (4-1) จะเห็นได้ว่าในปริมาณที่แตกต่างกัน แต่อุณหภูมิจะมีค่าคงที่



รูปที่ 2.4.3 กราฟ PV ของวัฏจักรสเตอร์ลิง

หลักการทำงานของเครื่องยนต์ที่ได้รับจากกฎเทอร์โมไดนามิกส์ สูตรที่แนะนำซึ่งเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของวัฏจักรสเตอร์ลิง (ความสามารถในการผลิตงานโดยเทอร์โมไดนามิกส์) ;

$$E = PV = nRT = constant. \quad (1)$$

$$P = \frac{V}{nRT} \quad (2)$$

เมื่อ

E= พลังงาน (J),

P= ความดัน (pa),

V=ปริมาตร (m^3),

n=เลขโมลของแก๊ส (mol),

R= ค่าคงที่ของแก๊ส ($JK^{-1}\,\mathrm{mol}^{-1}$),

T= อุณหภูมิ (K),

สูตรที่แสดงให้เห็นการใช้พลังงานของวัฏจักรขึ้นอยู่กับแรงดันและปริมาณ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในทั้งสองปัจจัยหลักมีผลต่อกำลังขับของเครื่องยนต์ กล่าวอย่างง่ายคือ อุณหภูมิด้านร้อนของเครื่องยนต์ทำให้เกิดความดันที่เพิ่มขึ้น และจะดันให้ลูกสูบย้ายลง เมื่อลูบสูบดันลงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจึงทำให้ ΔT และ ΔP ภายในกระบอกสูบทำให้เครื่องยนต์ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในช่วงเริ่มต้นไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ความร้อนอื่น ๆ แต่ปัจจุบันมีต้นแบบที่สมบูรณ์ขึ้นซึ่งมีประสิทธิภาพมากพอ และสามารถแข่งขันกับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้

2.4.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของวัฏจักรสเตอร์ลิงในทางอุดมคติ

จากรูป 2.4.1 และการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงใน 2.4.2 สามารถหาสมการสำหรับวัฏจักรสเตอร์ลิงทางอุดิมคติได้ดังนี้

ก). กำหนดข้อมูลอ้างอิงในสภาวะที่ 1 เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือ ปริมาตร

ข). กำหนดให้อัตราส่วนอุณหภูมิ (temperature ratio) $\tau = T_{min}/T_{max}$

ค). กำหนดให้อัตราส่วนการอัด (compression ratio) $r = V_{max}/V_{min}$

สำหรับสารทำงานต่อหนึ่งหน่วยมวล สมมุติให้สารทำงานเป็นก๊าซอุดมคติ ดังนั้น จะมีสมการตามกฎของก๊าซ คือ $V_1 = RT_1/\rho_1$

1). กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 1-2 ในกระบวนการนี้สารทำงานถ่ายเทความร้อนออกนอกระบบจนมีอุณหภูมิต่ำที่สุด งานที่กระทำต่อสารทำงานมีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทออกจากระบบ เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน และเอนโทนปีลดลง

$$p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = p_1 r \; ; \; T_2 = T_1 = T_{min}$$

ความร้อนที่ถ่ายเท (Q) = งานที่ให้ (W) $W = p_1 V_1 \ln(\frac{1}{r}) = RT_1 \ln(\frac{1}{r})$

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี $S_2 - S_1 = R ln \frac{1}{r}$

2). กระบวนการให้ความร้อนที่ปริมาตรคงที่ 2-3 ในกระบวนการนี้เป็นการให้ความร้อนโดยรีเจนเนอร์เรเตอร์ ทำให้อุณหภูมิเพิ่มจาก T_{min} เป็น T_{max} ซึ่งไม่มีงานเกิดขึ้น สารทำงานมีเอนโทรปีและพลังงานภายในเพิ่มขึ้น

$$p_3 = \frac{p_2 T_3}{T_2} = p_2 \tau = V_3 = V_2$$

3). การขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 3-4 ในกระบวนการนี้มีการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ระบบ มีงานเกิดขึ้นจากการขยายตัวของสารทำงาน ซึ่งเท่ากับปริมาณความร้อนที่ได้รับ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในแต่มีการเพิ่มขึ้นของเอนโทรปี

$$p_4 = \frac{p_3 V_3}{V_4} = p_3 r \; ; \; T_4 = T_3 = T_{max}$$

ความร้อนที่ถ่ายเท (Q) = งานที่ได้ (W) $W = p_3 V_3 \ln(r) = RT_3 \ln r$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4). กระบวนการคายความร้อนที่ปริมาตรคงที่ 4-1 ในกระบวนการนี้สารทำงานจะถ่ายเทความร้อนให้รีเจนเนอร์เรเตอร์ ทำให้อุณหภูมิลดลงจาก T_{min} เป็น T_{max} ไม่มีงานเกิดขึ้น พลังงานภายในและเอนโทรปีลดลง

$$p_1 = \frac{p_4 T_3}{T_2} = p_1\tau \; ; \; V_1 = V_4$$

ความร้อยถ่ายเท $$Q = C_v(T_1 - T_4)$$

งานที่ได้ (W) = 0

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

ในกระบวนการการถ่ายเทความร้อนจากรีเจนเนอร์เรเตอร์ ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับสารทำงานในกระบวนการ 2-3 จะถูกดูดซับคืนในกระบวนการ 4-1 เมื่อไม่มีการสูญเสียพลังงานจากสารทำงานหรือรีเจนเนอร์เรเตอร์จะได้ว่า

ความร้อนที่ให้แก่ระบบทั้งหมด (ที่ T_{min}) = $RT_3 \ln r$

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

และประสิทธิภาพทางความร้อน (η_{th}) $\eta_{th} = Q_{34} - Q_{12}/Q_{34}$

$$= \frac{RT_3 \ln r - RT_1 \ln r}{RT_3 \ln r}$$

$$\eta_{th} = 1 - \tau$$

ค่าที่ได้นี้ เทียบกับประสิทธิภาพคาร์โนท์ในช่วงอุณหูมิเดียวกัน

2.5 ประสิทธิภาพความร้อน

อัตราส่วนระหว่างงาน (W) ที่ได้กับพลังงานที่ป้อนเข้าไปสู่เครื่องยนต์ (Q) เรียกว่าประสิทธิภาพทางความร้อน (η)

$$\eta = \frac{W}{Q}$$

การเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนเป็นสิ่งสำคัญในหลายๆการประยุกต์ ตั้งแต่มีการพูดถึงเรื่องการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด เป็นเรื่องที่น่าสนใจที่จะทำให้เกิดค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ของค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยที่ค่าสูงสุดจะมีค่าไม่เกิน1 ตามกฎข้อที่สองของ เทอร์โมไดนามิก

2.5.1 ประสิทธิภาพ Carnot

สำรับทุกๆกรณี ตามทฤษฎีค่าสูงสุดของประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ของวัฏจักรตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_{max} = \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}}\right)$$

2.6 การสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในระบบ

2.6.1 การสูญเสีย Adiabatic

ในทางทฤษฎี ความร้อนจะใช้เวลาเพียงเล็กน้อยในการแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบอกสูบ สำรับเครื่องยนต์ที่ทำงานที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาทีจะมีช่วงการอัดตัวและขยายตัวกระมาน 10 มิลลิวินาที ดังนั้นอุณหภูมิของแก๊สในกระบอกสูบ จะตอบสนองกับค่าของความดันความดันเมื่อไรที่แก๊สใช้เวลาในการถ่ายเทความร้อนน้อย แก๊สนั้นจะประพฤติตัวเป็นระบบ Adiabatic แต่ในความเป็นจริงไม่มีระบบไหนที่เป็นแบบ Adiabatic เครื่องยนต์หลายๆชนิดทำได้เพียงเข้าใกล้ความเป็นอุดมคติ และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความผันผวนของอุณหภูมิก๊าซขนาดใหญ่ในถังจะเรียกว่าการสูญเสียเป็น Adiabatic

2.6.2 การสูญเสียฮีสเตอรีซีส

เป็นผลกระทบย่อยแต่มีผลกระทบอย่างมากกับการสูญเสีย Adiabatic เราจะไม่พิจารณาในกรณีที่การถ่ายโอนความร้อนในกระบอกสูบดีมาก หรือ เครื่องยนต์ทำงานช้ามาก อุณหภูมิของแก๊สจะแปรปรวนตามการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ถ้าประสิทธิภาพของอุณหภูมิเฉลี่ยของแก๊สเท่ากันกับอุณหภูมิของผนังลูกสูบ จะทำให้เกิดสมดุลทางความร้อนระหว่างผนังลูกสูบกับแก๊ส ทำให้ไม่มีการถ่ายโอนความร้อนกัน จะทำให้เกิดการสูญเสียฮีสเตอรีซีส

2.6.3 การสูญเสียช่องว่าง Appendix

เป็นการสูญเสียบริเวณช่องว่างระหว่างกกระบอกสูบและลูกสูบในเครื่องยนต์ ควรจะกันรั่วระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ เนื่องจากสารทำงานที่ไหลจากการผลักของลูกสูบไล่จะไม่ไหลไปยังแหล่งความร้อนรีเจนเนอร์เรเตอร์ หรือ ตัวระบายความร้อนทั้งหมด จึงทำสารทำงานไม่วนไปครบวัฏจักร การกันรั่วนั้นควรเป็นแหวนที่มีแรงเสียดทานต่ำเช่น เทฟล่อน ซึ่งควรจะอยู่บริเวณปลายที่ไม่ได้รับความร้อนมากนัก โดยส่วนมากลูกสูบไล่จะออกแบบมาให้มีลักษณะยาวอยู่แล้ว

2.6.4 แรงดันตก หรือการสูญเสีย Windage

เป็นการสูญเสียพลังงานที่สารทำงานกำลังเคลื่อนที่ผ่านบริเวณทำงาน ข้อสนับสนุนอย่างหนึ่ง คือโดยทั่วไปรีเจนเนอร์เรเตอร์จะช่วยเรื่องการแลกเปลี่ยนความร้อน แต่ก็เป็นตัวขัดขวางการไหลของสารทำงานด้วย ในรีเจนเนอร์เรเตอร์ Reynolds number โดยทั่วไปจะมีค่าน้อย เนื่องจากท่อในการน้ำสารทำงานมีขนาดเล็ก ตัวอย่างเช่น รีเจนเนอร์เรเตอร์อาจจะถูกสร้างมากจากขดลวดมารวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีรูขนาด 100 ไมครอน และสารทำงานไหลผ่านจะมีจุดสูงของ Reynolds number ที่ 100 ดังนั้น แรงที่ดันตก ประมาณได้ตามส่วนของอัตราไหล

2.6.5 การสูญเสียรั่วไหล

แม้ว่าห้องข้อเหวี่ยง ถูก Pressurized ก็มีแนวโน้มที่สารทำงานจะรั่วไหลผ่านการกันรั่ว ลูกสูบกำลังเพราะการแปรปรวนแรงดันในพื้นที่ทำงาน การรั่วไหลจะทำให้ลดขนาดของการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างมาก นำไปสู่การสูญเสียกำลัง อย่างไรก็ตาม การออกแบบเครื่องยนต์อย่างเหมาะสมและการกันรั่วที่ไม่รั่วซึมก็ไม่แน่นอนว่าจะทำให้สารทำงานบางส่วนรั่วไหลออกไประหว่างวัฏจักร

2.7 การนำความร้อน

วัสดุทุกชนิดจะมีขอบเขตการนำความร้อนได้มากหรือน้อยแตกต่างกัน โลหะจะสามรถนำความร้อนได้ดี ส่วนพลาสติกและเซลามิค จะนำความร้อนได้ไม่ดี ความสามารถในการนำความร้อนของแต่ละวัสดุจะเรียกว่า ความสามารถในการนำความร้อน (Thermal conductivity) มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร

การหาปริมาณการนำความร้อนในกระบอกสูบสามารถประมาณได้จากสมการ

$$Q_c = \frac{kA\Delta T}{l}$$

เมื่อ

Q_c คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น วัตต์

k คือ ค่าความสามารถในการนำความร้อน

A คือ พื้นที่ ที่ความร้อนไหลผ่าน

ΔT คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและเย็นในกระบอกสูบ

l คือ ความยาวของกระบอกสูบ

2.8 การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

William Beale พบว่า กำลังเอาท์พุทของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงหลายเครื่องสามารถประมาณได้จากสมการ

$W_0 \approx B_n P_m f V_0$

โดยที่

W_0 คือ กำลังเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B_n คือ Beale number

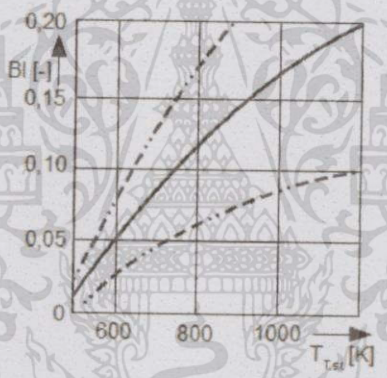
P_m คือ ความดันในเครื่องยนต์ มีหน่วยเป็น บาร์

F คือ ความถี่ของเครื่องยนต์ มีหน่วยเป็นเฮิตส์

V_0 คือ ปริมาตรเครื่องยนต์ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

สมการนี้ถูกพบโดย Beale ซึ่งสามารถประมานค่ากำลังได้ใกล้เคียงของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทุกประเภทและทุกขนาด ซึ่งรวมถึงเครื่องยนต์แบบ ลูกสูบอิสระ และเครื่องยนต์ที่มีข้อเหวี่ยง ในเครื่องยนต์ส่วนมากจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิฝั่งร้อนที่ 650 องศาเซนเซียส และ65 องศาเซลเซียสที่ด้านเย็น

เมื่อจัดรูปสมการจะได้เป็น P/ (pf V_0) จะเรียกค่านี้ว่า Beale number ในปัจจุบันเป็นที่แน่ชัดแล้วว่า Beale number จะเป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิร้อนและเย็น Walke ได้พบว่าความสัมพันธ์ของ Beale number กับอุณหภูมิด้านร้อนเป็นไปตรากราฟด้านล่าง



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Beale number กับอุณหภูมิด้านร้อน

ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์จะแสดงออกมาจะมีความแน่นอนเพียงเส้นเดียว ต้องเข้าใจก่อนว่าความสัมพันธ์ที่แสงนั้นเป็นการแสดงแบบคร่าวๆ และอาจจะกล่าวถึงตัวอย่างเครื่องยนต์ที่แพร่หลายแต่กระนั้นที่น่าแปลกใจเครื่องยนต์จำนวนมากจะพบว่าอยู่ในขอบเขตข้างใดข้างหนึ่ง ของกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น การออกแบบที่ดี มีประสิทธิภาพสูง อุณหภูมิด้านเย็นต่ำมีโอกาสที่จะเข้าใกล้ขอบเขตด้านบน ถ้าออกแบบไม่ดี ประสิทธิภาพต่ำอุณหภูมิด้านเย็นสูง มีโอกาสที่อยู่ขอบเขตด้านล่าง

2.8.1 วัสดุสำหรับกระบอกสูบ

ความหนาของกระบอกสูบที่จะรองรับความดันสามารถประมาณได้จากสมการ

$$\sigma = \frac{pd}{2t}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

σ คือ ค่าสูงสุดของความเครียดที่ยอมรับได้

P คือ ความดันภายในสูงสุด

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกระบอกสูบ

t คือ ความหนาของผนังกระบอกสูบ

ค่าความเครียดที่ใช้ในการคำนวณขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้สำรับผนังลูกสูบ ควรจะมีค่ามากกว่า 0.8 เท่าของความความเครียดสูงสุด โดยทั่วไปค่าความเค้นครากของโลหะจะอยู่ที่ประมาน 138 ถึง 1034 MN/m^2 และแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิ ค่าความเครียดปลอดภัยจะมีค่าลดลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในการออกแบบลูกสูบควรดำเนินการบนพื้นฐานความรู้ของเรื่องวัสดุ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปลักษณะพื้นฐานของความเครียดในโลหะอัลลอย จะทำได้ดีโดยเฉพาะรูปแบบการรักษาความร้อน หรือกระบวนการทางแมคคานิค

2.8.2 ซีล

การป้องกันการรั่วซึมเป็นปัญหาที่แก้ได้ยากที่สุดในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง วิธีการที่จะเพิ่มกำลังทางด้านเอาท์พุทของเครื่องยนต์สเตอน์ลิงคือการเพิ่มความดันของสารทำงานทำให้สารทำงานมีปริมาณและความดันมากขึ้น ในอณาคตสารทำงานในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมีเป็นก๊าซไฮโดรเจน หรือ ก๊าซฮีเลียม แทนอากาศ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องติดตั้งซีลเพื่อรองรับสารในงานในพื้นที่ทำงาน และเพื่อกันการรั่วซึมไปบริเวณห้องข้อเหวี่ยง

ในเครื่องยนต์ขนาดเล็กบางเครื่องถูกออกแบบให้มีการ เพรชเชอร์ไรซ์ในห้องข้อเหวี่ยงด้วย ส่วนในห้องสูบต้องเฟรชเชอร์ไรซ์ไว้ให้รองรับกับผลค่างควานดันที่เกิดขึ้นระหว่างห้องข้อเหวี่ยงกับพื้นที่ทำงาน ถ้าเครื่องยนต์มีขนาดใหญ่ การเพรชเชอร์ไรซ์ที่ห้องข้อเหวี่ยงจะมีผลน้อยมาก เนื่องจากขนาดและน้ำหนักของโครงสร้าง ต้องมีแรงดันด้วย ในกรณีที่ซีลกระบอกสูบอยู่ในวัฏจักรความดันที่ผลต่างอยู่ในช่วง (ความดันสูงสุด-ความดันบรรยากาศ) ถึง (ความดันต่ำสุด-ความดันบรรยากาศ)

2.9 สัดส่วนการอัด

ชนิดของแต่ละเครื่องยนต์มีองค์ประกอบที่ต่างกัน จึงยากที่จะเพิ่มอัตราส่วนการอัดให้มีค่ามากกว่า 2.5 ผลของความพยายามที่จะเพิ่มอัตราส่วนการอัด ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยลง สิ่งนี้จะมีผลให้พื้นที่ผิวสำรับการถ่ายโอนความร้อนมากเกินไป หรือเกิดแรงดันตกเนื่องจากแรงเสียดทานจากอากาศมากเกินไป

เป็นผลมาจากอัตราการอัดปริมาตรต่ำ อัตราส่วนแรงดัน(แรงดันสูงสุด/แรงดันต่ำสุด) ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งหาได้ยากที่ค่ามากกว่า 2 ยิ่งไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่านั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงความยังดันต่ำมาก สำรับลักษณะเฉพาะของความดันจะเหมือนกับค่าไซน์ มันเป็นผลที่น่าสนใจในการออกแบบเครื่องยนต์ โดยเฉพาะกับลูกปืนและเพลา

เครื่องยนต์ที่ดีควรจะประมาณจากค่าแรงดันเฉลี่ยในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามกระบอกสูบต้องออกแบบมารองรับความดันสูงสุดในกระบอกสูบด้วย โดยที่อัตราสวนความดันควรอยู่ที่ (Pmax/Pmin) = 2 หรือ $P_{max} = (\frac{4}{3})P_{mean}$

2.10 พัฒนาการของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

2.10.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในยุคแรก

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงประดิษฐ์ขึ้นโดย Robert Stirling ชาวสก๊อตแลนด์เมื่อปี ค.ศ.1816 เครื่องยนต์ให้กำสังต่ำ ใช้ทำงานเป็นเครื่องยนต์สูบน้ำตั้งแต่กลางศตวรรษที่ 19 จนถึงประมาณปี ค.ศ. 1920 ก็เสื่อมความนิยม เนื่องจากการเข้ามาแทนของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในซึ่งให้กำลังงานที่สูงกว่า (เมื่อเทียบน้ำหนักของเครื่องยนต์ที่เท่ากัน)

2.10.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในยุคสอง

ประมาณปี ค.ศ.1937 ห้องปฏิบัติการวิจัยของฟิลลิปส์แห่งฮอลแลนด์ได้เริ่มพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขึ้นสูระดับเทคโนโลยีที่สูงขึ้น โดยในเบื้องต้นได้ทำการพัฒนา เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้งานกับเครื่องปั่น ไฟฟ้าสำหรับเครื่องรับวิทยุที่ใช้ในท้องถิ่นกันดาร นอกจากนี้ทีมนักวิจัยของฟิลลิปส์ยังพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

2.10.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์

ปี ค.ศ. 1952 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง “102 C” ได้รับการพัฒนาขึ้นจนมีกำลังงานสูง 30 เท่าของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในสมัยแรกเริ่ม ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในก็เป็นปัญหาสำคัญสำหรับโลกยุคปัจจุบัน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีข้อดีในแง่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเครื่องยนต์ทำงานเงียบมากและการควบคุมการเผาไหม้ที่อยู่ภายนอกเครื่องยนต์สามารถทำได้ง่ายกว่า ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่สะอาดกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ในด้านพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบที่นิยมใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานร่วมกับจานรับแสงอาทิตย์ (Stirling-Dish Module) โดยแสงอาทิตย์จะเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า ปัจจุบันมีเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีประสิทธิภาพสูงคือเครื่องยนต์ที่ผลิตจาก Cummins Motor Company ซึ่งให้ประสิทธิภาพถึงร้อยละ 32 ในการแปลงพลังแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า และเครื่องยนต์ที่ผลิตจาก Stirling Technology Company ซึ่งให้ประสิทธิภาพ ร้อยละ 30.7 ในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่สนับสนุนโดย National Space Development Agency ของประเทศญี่ปุ่น ได้พัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิด semi free piston ขึ้น เครื่องยนต์สามารถแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยประสิทธิภาพร้อยละ 20 และมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ร้อยละ 33 สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลก็มีการวิจัยพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานคู่กับเตาเผาชีวภาพ เพื่อผลิตกระแสไฟสำหรับใช้ในหมู่บ้านชนบท โดยก๊าซที่ใช้ทำงาน (working gas) ของเครื่องยนต์คืออากาศธรรมดามีกำลังอัด 33 บาร์ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 600 รอบต่อนาที จะให้กำลังเพลา (shaft power) 3.2 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพรวม (overall efficiency) ร้อยละ 25 แม้ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมีข้อดีหลายประการแต่ก็มีข้อด้อยและอุปสรรคบางประการที่ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงยังไม่สามารถขยายการใช้งานและแข่งขันเชิงพาณิชย์กับเครื่องยนต์ชนิดอื่นในท้องตลาดได้ อุปสรรคที่สำคัญได้แก่ กำลังที่ผลิตได้ต่อน้ำหนักเครื่องที่ต่ำ ทำให้เครื่องยนต์มีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะสำหรับในอุตสาหกรรมยานยนต์ ส่วนอุปสรรคอื่นๆ ที่รองลงมาได้แก่ราคาขายในขณะเริ่มต้นที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากยังเป็นสินค้าที่ผลิตจำนวนน้อยชิ้น ซึ่งการแก้ปัญหานี้สามารถแก้โดยการเลือกใช้ชิ้นส่วนที่จะนำ มาใช้สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่เป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักรอื่นที่มีการผลิตทางอุตสาหกรรมที่ละมากๆ อยู่แล้วดังตัวอย่างเช่น งานวิจัยพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาที่ใช้ชิ้นส่วนของข้อเหวี่ยงจากเครื่องยนต์ของรถจักรยานยนต์ หรือการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมม่า ที่มีกำลัง 1 กิโลวัตต์ ขึ้นโดยใช้บางส่วนของ compressor จากเครื่องทำความเย็นเป็นองค์ประกอบ

แต่อย่างไรประเทศไทยก็ยังมีการวิจัยทางด้านเครื่องยนต์สเตอร์ลิงน้อยอยู่ ดังนั้นจึงน่าจะมีการวิจัยทางด้านนี้ขึ้นเพื่อใช้กับพลังงานทางเลือกอื่นนอกจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ซึ่งควรเริ่มจากเครื่องยนต์ระดับโมเดลไปจนถึงระดับกำลังสูงที่สามารถทำงานได้จริงต่อไป

2.12 การประยุกต์ใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

2.12.1 การประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน

1. การทำวิจัยและรายงาน

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นหัวข้อสำหรับการศึกษาทฤษฎีและการปฏิบัติเพื่อที่จะรู้เกี่ยวกับมันมากขึ้นอีก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงในการเพิ่มประสิทธิภาพให้เพิ่มมากขึ้น ยังเป็นต้นแบบในการสร้างพลังงานได้อีกด้วย

2. ทางทหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากจะขนอาวุธเข้าประเทศที่ห้ามนำอาวุธเข้าไปนั้น เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องมือในการโจมตีเรือดำน้ำของกองทัพสวีเดน ช่วยในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในงานที่สำคัญเมื่อมีความไม่พร้อมของแหล่งจ่ายพลังงาน มีการทำงานที่เงียบ ในขณะเดียวกัน ทางกองทัพเรือของออสเตรเลียยังได้นำมาใช้ในการขับเคลื่อนเรือดำน้ำขนาด 3000 ตัน

3. ทางอวกาศ

ดาวเทียมบางลำใช้พลังงานจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิง มีประสิทธิภาพเฉพาะตัวสูงเมื่อมีความต่างของอุณหภูมิ แหล่งพลังงานความร้อนประกอบด้วยไอโซโทปกัมมันตรังสี การใช้ธาตุกัมมันตรังสีนั้น จะนำมาซึ่งวามเสี่ยงขณะนำจรวดออก เนื่องจากแผงแสงอาทิตย์สามารถถูกทำลายในบางเขตพื้นที่ที่ใกล้กับดาวอังคาร

4. แสงอาทิตย์

การที่ใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์นี้ จะใช้จานสะท้อนแสงที่ตกกระทบในจุดๆหนึ่ง ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการติดตั้งในพื้นที่ทะเลทรายกบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยไม่ต้องใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

5. ทางทะเล

SAGA (Submarine Assistance Great Autonomy) เริ่มใช้ในปี 1990 ได้รับการอนุญาตให้ใช้ครอบคลุมมากกว่า 150 ไมล์ทะเล สำหรับแคมเปญ 10 วันต่อ 300 เมตรความลึก เป็นแรงขับเคลื่อนโดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 2 ตัวพร้อมกับดีเซลและออกซิเจนเหลว.

6. ทางอุณหภูมิ

มักใช้ในอุตสาหกรรม ประสิทธิภาพของมันดีเยี่ยม ในประเภทของการใช้งานนั้นจะแปลงพลังงานจากแหล่งความเย็นไปแหล่งความร้อน เหมือนกับตู้เย็น การทำงานนี้จะมีประสิทธิภาพเมื่อใช้ในการติดตั้งประเภทแก๊สของเหลว

7. ที่อยู่อาศัย

สำหรับที่อยู่อาศัยเล็กๆ จะใช้สำหรับสร้างไฟฟ้าและเกี่ยวกับความร้อนต่างๆ เลือกใช้เชื้อเพลิงไปสร้างไฟฟ้าและความร้อนในบ้าน อีกส่วนหนึ่งเป็นไปได้ที่จะนำไฟฟ้าที่ได้ไปขาย

8. ทางเครื่องยนต์รถยนต์

ในระหว่างปี 1940-1980 บริษัท Philips ศึกษาเกี่ยวกับการทำงานต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ส่วนหนึ่งที่ถูกประกอบไปในอุปกรณ์ของ Ford Torino แต่เมื่อทดสอบแล้วไม่สำเร็จและถูกหยุดไป

9. เครื่องกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากสงครามโลกครั้งที่2 Philips ได้พัฒนาและขายตัวกำเนิดอย่างในรูป มีกำลังประมาณ 150 watt

2.11.2 การประยุกต์ใช้ในอนาคต

1. ทางทหาร

มีความเป็นไปได้ว่าจะใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรือเรือและเรือดำน้ำ อย่างในตอนนี้ที่สวีเดนและออสเตรเลียเริ่มใช้เชื้อเพลิง (เช่น ออกซิเจนเหลว และไฮโดรเจนเหลว) จะช่วยลดความเสี่ยงในการปนเปื้อนเมื่อเกิดอุบัติเหตุ

2. ทางเรือ

ใช้เป็นการขับเคลื่อนเรือและเป็นแหล่งสร้างพลังงานไฟฟ้า

3. ทางอุตสาหกรรม

พลังงานทั้งหมดที่ปล่อยออกมาสู่ชั้นบรรยากาศนั้นสามารถสร้างแรงบันดาลใจในการสร้างพลังงานได้ การใช้ความร้อนและเคมีในการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ในปริมาณที่มาก

4. ที่อยู่อาศัย

อาจจะมีการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมากขึ้น สำหรับสร้างกระแสไฟฟ้า สร้างความร้อนใช้ในบ้าน ซึ่งแหล่งความร้อนอาจมาจากดวงอาทิตย์ก็ได้ นอกจากนี้แล้วการทำงานของตู้เย็นที่ทำลายชั้นบรรยากาศโอโซนนั้นอาจนำเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมาใช้งานแทนที่ นำไฟฟ้าที่เหลือใช้มาซื้อ-ขายตามฤดูกาล

2.13 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electric generator)

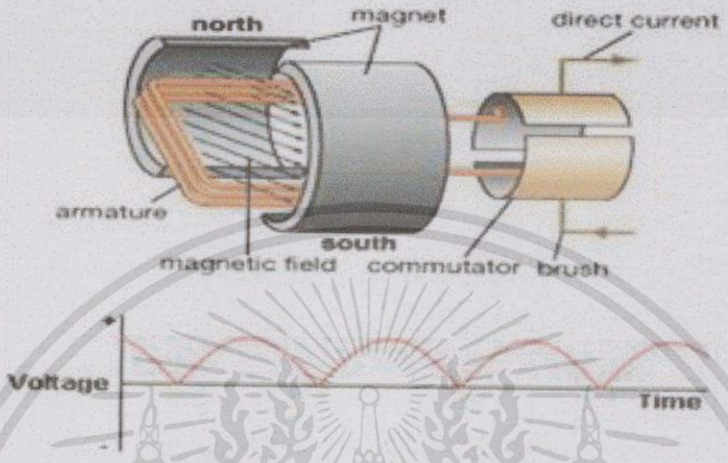
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electric generator) คือ เครื่องกลที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการทำงาน ของสนามแม่เหล็กเมื่อเคลื่อนที่ตัดขดลวด หรือขดลวดเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กจะได้เป็นแรงดันไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญสองส่วนคือ ส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็ก เรียกกว่า ฟิลด์ และส่วนที่สร้างแรงดันไฟฟ้าเรียกว่าอาเมเจอร์ ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ฟิลด์จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ อาเมเจอร์จะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ แต่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ฟิลด์และอาเมเจอร์ สามารถเป็นได้ทั้งส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่หมุน โดยในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก จะสามารถสร้างได้ทั้งแบบฟิลด์และอาเมเจอร์หมุน แต่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ จะสร้างได้แต่แบบอาเมเจอร์อยู่กับที่เท่านั้น เพราะจะมีปัญหาน้อยกว่า

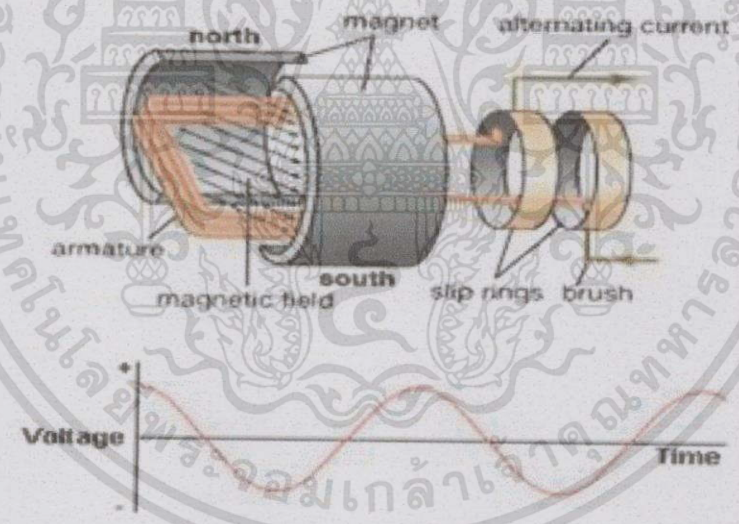
แรงดันที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญสองตัวคือ ความเร็วรอบและเส้นแรงแม่เหล็ก ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเราสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย การปรับความเข้มของสนามแม่เหล็ก และเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องกำเนิด แต่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับการเพิ่มแรงดันโดยการเพิ่มความเร็วไม่สามารถที่จะทำได้ เพราะจะทำให้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้เปลี่ยนแปลงไป สามารถทำได้เพียงการปรับความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่านั้น



รูปที่ 2.13.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.13.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ แตกต่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมีวงแหวนลื่น(slip ring) มีลักษณะเป็นวงแหวน 2 วง เมื่อขดลวดหมุนตัวจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าวิ่งกลับไปกลับมาในวงจร จึงเรียกว่าไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาทรงตัววี มีอุปกรณ์ต่างๆที่ต่อยึดกลายเป็นสเตอร์ลิงมีทั้งวัสดุแบบเหล็ก เหล็กเหนียวและอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบของแต่ละวัสดุ เพื่อรองรับภาระทางความร้อนของระบบ

รูปที่ 3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาทรงตัววี

3.1.1 เสื้อสูบ

ทำจากอลูมิเนียมหาได้ง่าย ราคาถูก และยังขึ้นรูปได้ง่ายอีกด้วย โดยใช้เครื่องกลึง CNC กลึงขึ้นรูปและเจาะรูตรงกลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 50mm ด้านในเสื้อสูบจะเป็นกระบอกสูบสำหรับการเคลื่อนที่ของลูกสูบ เจาะผิวด้านในให้เรียบเพื่อป้องกันอากาศรั่วซึมและลดแรงเสียดทานที่จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ตัวของเสื้อสูบได้ทำระบบระบายความร้อนด้วยน้ำโดยทำเป็นท่อต่อออกมาสำหรับสายยาง โดยน้ำจะเคลื่อนที่จากท่อหนึ่งออกไปอีกท่อหนึ่งเพื่อลดภาระการสะสมความร้อนของตัวเสื้อสูบโดยจะมีทั้งทางด้านฝั่งด้านร้อนและฝั่งเย็น และมีรูข้างบนสำหรับท่อรีเจนเนอร์เรเตอร์ดังรูปที่ 3.1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1.1 เสื้อสูบ

3.1.2 กระบอกสูบรับความร้อน

ทำจากเหล็กเพราะทนความร้อนได้สูงสร้างโดยกลึงให้มีความหนาเพียง 2mm ไม่น้อยเกินไปไม่มากเกินไป หากบางไปอาจเกิดปัญหาการรั่วได้ หนาไปส่วนรับความร้อนจะรับภาระมากไป ในขณะที่กระบวนการทำงานนั้นความร้อนถูกลดลงไปเนื่องจากความหนาของเหล็ก สามารถทนความร้อนได้ที่ 700 องศา

รูปที่ 3.1.2 กระบอกสูบรับความร้อน

3.1.3 ลูกสูบ

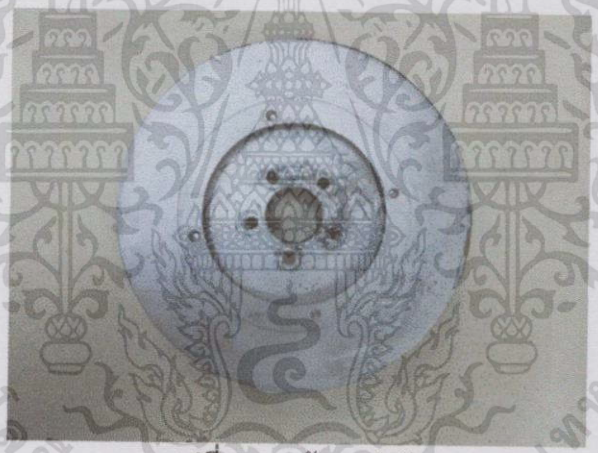
ทำจากอลูมิเนียม เพราะเป็นวัสดุชนิดเดียวกับกระบอกสูบของเสื้อสูบเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการขยายตัวที่เท่ากัน และมีน้ำหนักเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1.3 ลูกสูบ

3.1.4 ล้อตุนกำลัง

ทำจากอลูมิเนียม เพราะราคาถูกไม่เกิดสนิมออกแบบมาให้เป็นทรงตันและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 นิ้ว เพื่อให้มีน้ำหนักในการส่งแรงให้หมุนครบรอบ ทำร่องของสายพรานไว้ขนาดร่อง 2 mm



รูปที่ 3.1.4 ล้อตุนกำลัง

3.1.5 ข้อเหวี่ยงและก้านสูบ

ข้อเหวี่ยงทำจากเหล็กเพื่อให้มีน้ำหนักแรงในการขับเพลา กลึงขึ้นรูปโดยเครื่องกลึงมีความแข็งแรง โดยรูตรงกลางสวมกับเพลา รูที่เยื้องจากศูนย์กลางคือรูที่ยึดกับก้านสูบ ส่วนก้านสูบมีหน้าที่ดันลูกสูบขึ้นลงตามแนวกระบอกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1.5 ก้านสูบและข้อเหวี่ยง

3.1.6 รีเจนเนอร์เรเตอร์

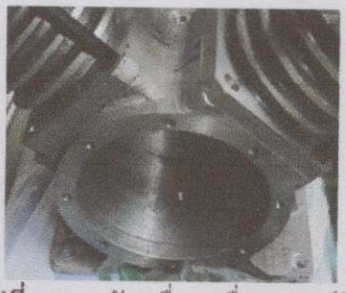
รีเจนเนอร์เรเตอร์นี้เป็นส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน และเป็นที่กักเก็บอุณหภูมิความร้อนระหว่างพื้นที่ความร้อนและเย็น หรือเป็นที่ผ่านของของไหลโดยตรงเป็นอย่างแรก มันจะกักเก็บระบบความร้อนที่แลกเปลี่ยนกับอุณหภูมิแวดล้อมเป็นตัวคั่นกลางระหว่างการหมุนเวียนของอุณหภูมิสูงสุดกับต่ำสุด ทำจากอลูมิเนียมมีครีบระบายความร้อนตรงกลางท่อ

รูปที่ 3.1.6 รีเจนเนอร์เรเตอร์

3.1.7 ตัวเครื่องสเตอร์ลิง

เป็นส่วนห้องเครื่องของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ภายในจะเป็นส่วนการทำงานของเพลาข้อเหวี่ยงและก้านสูบ ทำการหล่ออลูมิเนียมจากแบบที่ทำไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1.7 ตัวเครื่องเครื่องสเตอร์ลิง

3.1.8 ห้องเผาเชื้อเพลิง

เป็นฝาครอบกระบอกสูบร้อนที่ทำจากอลูมิเนียมทนความร้อนได้สูงและทำให้การเผาของกระบอกสูบทั่วถึงกระบอกสูบร้อน

รูปที่3.1.8 ห้องเผาเชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ

รายการ	หน้าที่	คุณสมบัติ	วัสดุ	หมายเหตุ
1. เครื่องยนต์สเตอร์ลิง				
- ฝาประกอบตัวเครื่อง	ยึดกับตัวเครื่อง	ยึดกับเพลา	อลูมิเนียม	
- เสื้อสูบ	เป็นตัวยึดกับตัวเครื่องสเตอร์ลิงด้านร้อนและเย็น	มีรูต่อท่อระบายความร้อนด้วยน้ำ	อลูมิเนียม	
- กระบอกสูบรับความร้อน	ฮีตเตอร์	ทนความร้อนได้ 700 องศา	เหล็ก	
- เพลา	เป็นแกนยึดก้านสูบลูกสูบไล่การทำงาน	ผิวแข็งทนความร้อน	เหล็กเหนียว อลูมิเนียม	
- ลูกสูบ	ช่วยกำลังแรงลูกสูบ	ขนาดและมวลไม่มากเกินไปจนส่งผลต่อ	เหล็ก	
- ข้อเหวี่ยง				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		เพลา		
	ใช้รองรับกานหมุนของเพลา	ลดแรงเสียดทาน	เหล็ก	
- ลูกปืน		ระหว่างผิวสัมผัส		
	ช่วยให้ลูกสูบเคลื่อนที่เป็น	-	เหล็ก	
- ก้านสูบ	เส้นตรง			
	ยึดข้อเหวี่ยงกับก้านสูบ	-	เหล็กชุบแข็ง	
- สลักก้านสูบ	ล้อตุนกำลัง	ช่วยทำให้ได้รอบ	อลูมิเนียม	
- Flywheel	ทางเชื่อมด้านร้อนและเย็นมี	ช่วยระบายความร้อน	อลูมิเนียม	
- รีเจนเนอร์เรเตอร์	ที่ระบายความร้อน	ในการแลกเปลี่ยน		
		ด้านร้อนและเย็น		
	กันกระแทกป้องกันการ	ทนความร้อนได้ 300	ยาง	
- โอริง	รั่วซึม	องศา		
	เพื่อให้กระบอกสูบและเสื้อ	สามารถดูดซับแรง	หนัง	
- ปะเก็น	สูบยึดติดกันสนิท	กระแทกแล้วกลับสู่		
		สภาพเดิมได้		
2. สายพาน				-ต่อเข้ากับ
3. สายยาง				น้ำช่วยใน
4. ไดนาโมจักรยาน				การ
5. เครื่องวัดแรงบิด				แลกเปลี่ยน
6. มัลติมิเตอร์				ความร้อน
7. เครื่องวัดน้ำหนัก				
8. อุปกรณ์ถ่วงน้ำหนัก				
9. เครื่องวัดอุณหภูมิ				
10. นาฬิกาจับเวลา				

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

3.2.1 เครื่องวัดรอบ วัดโดยหัวของตัวเครื่อง ปรับโหมดวัดรอบ rpm ขณะล้อตุนกำลังหมุนให้ไปจ่อหัวเพลา ค่าตัวเลขจะปรากฏที่จอมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2.1 เครื่องวัดความเร็วรอบ

3.2.2 อุปกรณ์วัดแรงบิดด้วยตาชั่งสปริงแบบดิจิตอล ใช้วิธีเดียวกับไดนาโมมิเตอร์แบบเชือกรัดและอ่านค่าจากตาชั่ง

รูปที่ 3.2.2 อุปกรณ์วัดแรงบิดและวิธีการวัดแรงบิด

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงบิดและกำลัง

แรงบิด (**T**)

$$T = F \times r = (w_1 - w_2) \times r$$

กำลัง (P)

$$P = T \times \omega = T(2\pi N)/60$$

โดยที่ T = แรงบิด (N.M)

F = แรงที่ล้อตุนกำลังกระทำกับเชือก (N)

r = รัศมีของล้อตุนกำลัง (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W_1 = ค่าที่อ่านได้จากตาชั่ง

W_2 = ค่าที่อ่านได้จากตาชั่ง

N = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์

P = กำลังของเครื่องยนต์

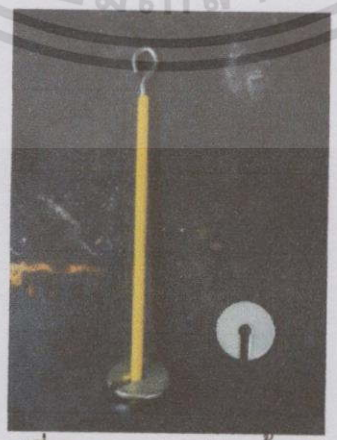
ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

3.2.3 แหล่งความร้อน ให้ความร้อนกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้ท่อในการพ่นไฟจากถังแก๊สที่ปรับค่าแรงดันได้

รูปที่ 3.2.3 แหล่งความร้อน

3.2.4 นาฬิกาจับเวลา ใช้จับเวลาเพื่อจดบันทึกค่าที่เวลาต่างๆ

3.2.5 อุปกรณ์ถ่วงน้ำหนัก ใช้ในการถ่วงน้ำหนักโดยวงแหวนมีน้ำหนัก 10 กรัม

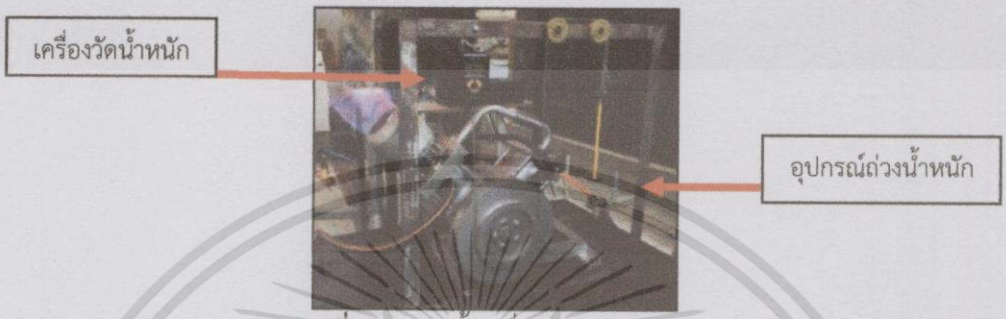


รูปที่ 3.2.5 อุปกรณ์ถ่วงน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลองหาแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

1. ทำการติดตั้งเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาให้พร้อมใช้งานและติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงบิด เตรียมอุปกรณ์วัดความเร็วรอบและนาฬิกาจับเวลา ดังรูปที่ 3.3.1



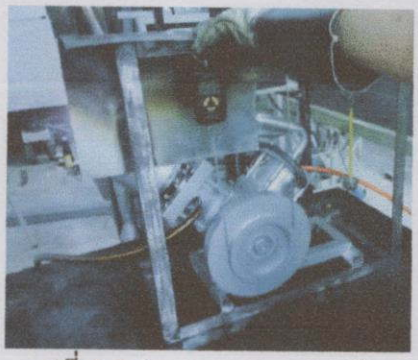
รูปที่3.3.1 ติดตั้งเครื่องกับชุดทดลอง

2. ให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่อัตราการไหลของแก๊สที่ 0.6และเริ่มจับเวลาเมื่อถึงเวลาที่กำหนดบันทึกความเร็วรอบที่ได้จากการวัด จดค่าต่างๆทุก 2 นาที ดังรูปที่ 3.3.2

รูปที่ 3.3.2 ใช้เครื่องวัดความเร็วรอบกับล้อตุนกำลัง

3. ทำการวัดแรงบิดเมื่อเครื่องยนต์วิ่งในความเร็วคงที่โดยค่อยๆถ่วงน้ำหนัก 10 กรัมค้างไว้ อ่านค่าจากตาชั่งสปริงทั้งสอง อ่านค่าความเร็วรอบแล้วบันทึกผล จากนั้นเพิ่มแหวนน้ำหนัก 10 กรัม ค้างไว้อ่านค่าและบันทึกผลซ้ำไปเรื่อยๆ จนเครื่องหยุดวิ่ง ดังรูปที่ 3.3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3.3 การทดลองหาแรงบิด

4. ทำการรวมข้อมูลคิดหาค่าแรงบิด กำลังของเครื่อง และเปรียบเทียบข้อมูลนำบันทึกผลการทดลองที่ได้ไปแสดงออกมาเป็นกราฟ ดูความสัมพันธ์ สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.จัดเก็บอุปกรณ์และเครื่องยนต์ให้เรียบร้อย

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

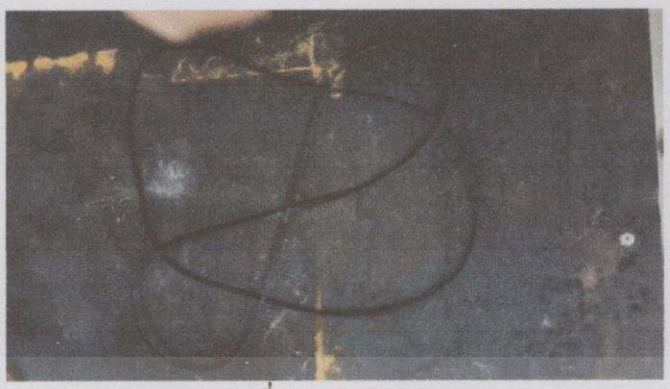
3.4.1 เครื่องวัดรอบ วัดโดยหัวของตัวเครื่อง ปรับโหมดวัดรอบ rpm ขณะล้อตุนกำลังหมุนให้ไปจ่อหัวเพลา ค่าตัวเลขจะปรากฏที่จอมิเตอร์

3.4.2 มัลติมิเตอร์ ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของไดนาโมดังรูปที่ 3.4.1

รูปที่ 3.4.1 มัลติมิเตอร์

3.4.3 สายพาน ใช้ขึงล้อตุนกำลังกับไดนาโมมีลักษณะที่ตึงไม่ยืดดังรูปที่ 3.4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

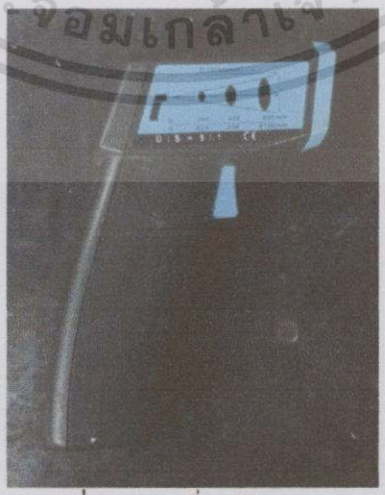


รูปที่ 3.4.2 สายพาน

3.4.4 ไดนาโม มีขนาดแรงดันไฟฟ้า 12 V มีร่องสายพานหมุนลื่นมาฝืดดังรูปที่ 3.4.3

รูปที่ 3.4.3 ไดนาโม

3.4.5 เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดโดยทำการยิงไปที่วัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิมีเซนเซอร์และแสดงผลในหน้าจอ มีระยะการยิงที่เหมาะสม 20-30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.4.4



รูปที่ 3.4.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

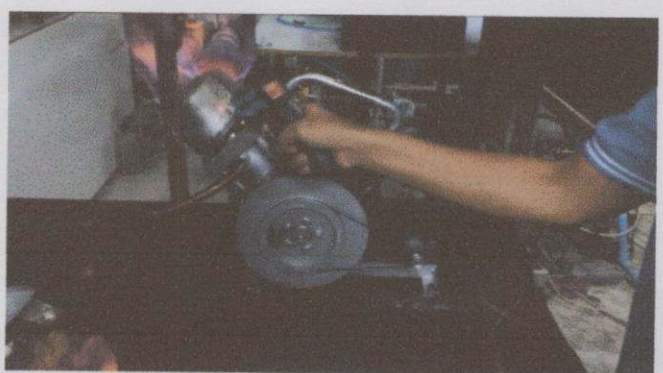
3.4.6 นาฬิกาจับเวลา ใช้จับเวลาเพื่อจดบันทึกค่าที่เวลาต่างๆ

3.5 วิธีการทดลองหาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

1. ทำการติดตั้งเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาสายพรานต่อกับไดนาโมและพร้อมเตรียมชุดอุปกรณ์การทดลอง ดังรูปที่ 3.6.1

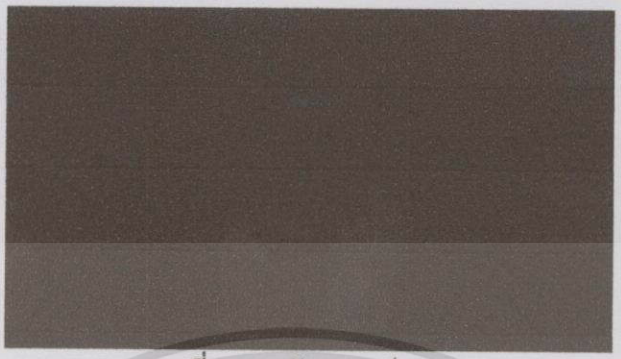
รูปที่ 3.5.1 เตรียมชุดการทดลองแรงดันไฟฟ้า

2. ทำการทดลองโดยให้ฮีตเตอร์และเริ่มจับเวลา เมื่อถึงเวลาที่กำหนดให้ทำการวัดรอบที่ล้อตุนกำลัง วัดอุณหภูมิด้านร้อนและเย็น และวัดแรงได้ไฟฟ้าจากไดนาโมในขณะที่ล้อตุนกำลังหมุนโดยใช้มัลติมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.6.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5.2 วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.5.3 วัดความเร็วรอบ

รูปที่ 3.5.4 วัดแรงดันไฟฟ้า

3. ทำการบันทึกค่าทุกๆ 2 นาที

4. ทำการรวบรวมข้อมูลบันทึกผลการทดลองที่ได้ไปแสดงออกมาเป็นกราฟ ดูความสัมพันธ์ สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

5. จัดเก็บอุปกรณ์การทดลอง และเครื่องยนต์ให้เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ตารางการทดลอง

4.1.1 ตารางบันทึกผลการหาแรงบิด

Speed (rpm)	ω (Hz)	w_1(weight)kg	w_1(N)	w_2(scale)kg	w_2(N)	$lw_1 - w_2l$ (N)	τ $(lw_1 - w_2l)\times R$	P $(\tau\times\omega)$
190	3.166	0.010	0.1	0	0	0.10	0.0064	0.0202
185	3.083	0.020	0.2	0	0	0.20	0.0128	0.0394
177	2.916	0.030	0.3	0	0	0.30	0.0192	0.0559
168	2.800	0.040	0.4	0	0	0.40	0.0256	0.0716
163	2.716	0.050	0.5	0	0	0.50	0.0320	0.0869
158	2.633	0.060	0.6	0	0	0.60	0.0384	0.1011
150.7	2.511	0.070	0.7	0	0	0.70	0.0448	0.1124
135	2.250	0.080	0.8	0	0	0.80	0.0512	0.1152
134	2.233	0.090	0.9	0	0	0.90	0.0576	0.1286
129.8	2.163	0.100	1.0	0	0	1.00	0.0640	0.1384
124.3	2.071	0.110	1.1	0	0	1.10	0.0704	0.1457
82.3	1.371	0.120	1.2	0.075	0.75	0.45	0.0288	0.0394

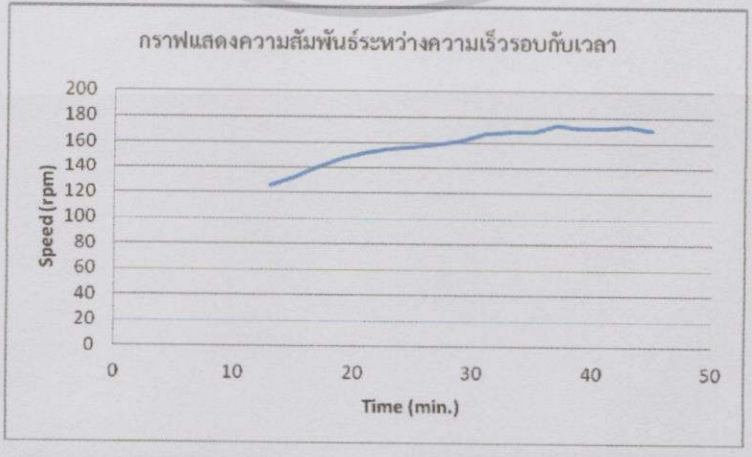
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ตารางบันทึกผลของเวลา ความเร็วรอบ อุณหภูมิฝั่งร้อน อุณหภูมิฝั่งเย็นและแรงดันไฟฟ้า

Time (min)	Speed(rpm)	Temp (°C) (heat)	Temp (°C) (cold)	voltage(V)
13	125.4	380	56	1.6
15	132	386	54	1.8
17	140	380	59	2.8
19	148	387	51	2.9
21	152	390	57	2.9
23	155	391	59	2.9
25	157	396	58	3.0
27	159	400	63	3.0
29	162	399	60	3.1
31	167	401	60	3.1
33	169	397	60	3.1
35	169	407	63	3.1
37	174	410	61	3.2
39	172	409	59	3.2
41	172	407	59	3.2
43	173	407	60	3.2
45	170	410	61	3.2

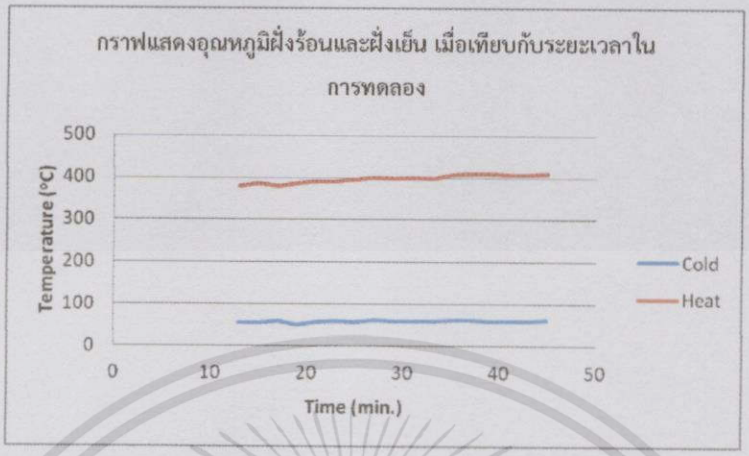
4.2 กราฟจากการทดลอง

4.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับเวลา



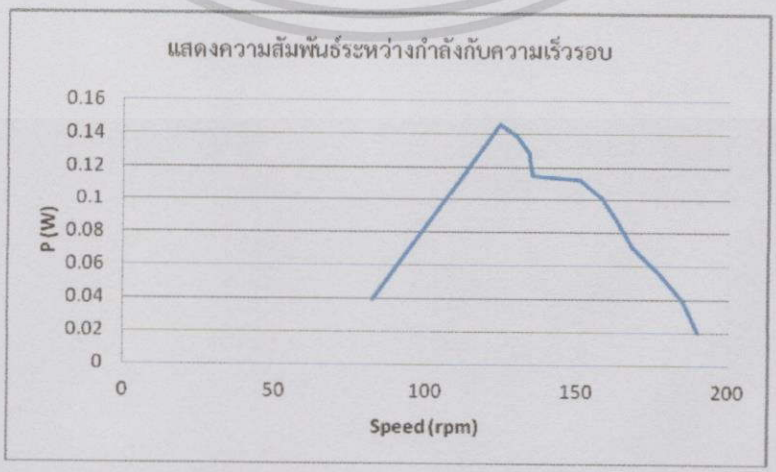
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 กราฟแสดงอุณหภูมิฝั่งร้อนและฝั่งเย็น เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการทดลอง



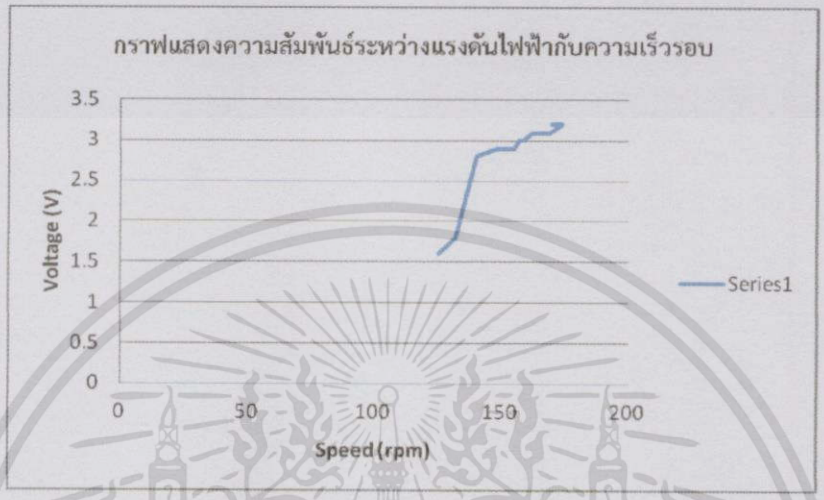
4.2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ

4.2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความเร็วรอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผล วิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า เครื่องยนต์จะสามารถจะเริ่มทำงานได้เมื่ออุณหภูมิของส่วนร้อน มีอุณหภูมิที่ประมาณ 140 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเร็วรอบ งาน และกำลังของเครื่องยนต์จะเพิ่มตามไปด้วย เครื่องยนต์นี้สามารถทนความร้อนได้สูง ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับความร้อนในระบบอื่นๆได้ เช่น พลังงานเหลือใช้จากการเผาไหม้ในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

5.2 สรุปผล

1. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบสูบวี สามารถเริ่มทำได้ตอนที่ส่วนร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียสโดยตอนเริ่มต้นจะมีความเร็วรอบประมาณ 143 รอบต่อนาที และมีความเร็วสูงสุดขณะการทดลองที่ 205 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส
2. เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น จะทำให้ความเร็วรอบ และกำลังมากขึ้นไปด้วย
3. เมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้น ทำให้รีเจนเนอร์เรเตอร์สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้นโดยที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ที่เครื่องยนต์นี้สามารถผลิตได้คือ 3.2 V

5.3 ปัญหาที่พบเจอ

1. โอริงที่ใสในกระบอกสูบ แน่นเกินไปก่อให้เกิดแรงเสียดทานสูง ทำให้เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้
2. อุปกรณ์สำรับรับความร้อนหนาเกินไปทำให้การถ่ายโอนความร้อนช้า เครื่องยนต์ต้องการเวลาในการเริ่มทำงานนานขึ้น
3. เกิดตามบริเวณห้องข้อเหวียง บริเวณรอยเชื่อม
4. ไม่มีห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานสู่สิ่งแวดล้อม
5. มีการไถลของสายพานระหว่างล้อตุนกำลังกับรีเจนเนอร์เรเตอร์ทำให้เกิดการเสียพลังงาน

5.4 สิ่งที่ควรปรับปรุง

1. ลดความหนาของส่วนที่รับความร้อนไม่ให้เกิน 3 มิลลิเมตร
2. ป้องกันการรั่วของสารทำงานภายใน และให้ความดันภายในคงที่
3. ใช้ห้องเผาไหม้ที่มีฉนวนกันความร้อนเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน
4. ร่องสายพานควรมีการทำร่องสำรับยึดกับสายพานเพื่อลดการไถลเมื่อทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. สารทำงานที่ใช้อยู่เป็นอากาศซึ่งหาง่ายและใช้ได้ในระดับปานกลาง การพัฒนานั้นสามารถเลือกใช้ไฮโดรเจนหรือฮีเลียม เพราะมีอัตราการถ่านเทความร้อนที่สูง

2. การสูญเสียพลังงานในเครื่องยนต์ เนื่องจากรั่วไหลของอากาศ และปัญหานี่เป็นปัญหาที่สำคัญกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทุกประเภท ดังนั้นการออกแบบควรจะทำให้มีช่องว่างน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการรั่วไหล หรืออาจจะใช้ประเก็นช่วยกั้นในการประกอบชิ้นส่วนสองชิ้นต่อกัน แต่ประสิทธิภาพอาจจะไม่ดีนักทางที่ดีที่สุดควรจะออกแบบให้เป็นสลักสวมกันพอดี หรือเป็นสลักเกลียวในเกลียวนอก

3. โหลดหลอดไฟที่นำมาต่อควรจะเป็นหลอด led ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าทำให้สามารถเห็นผลได้อย่างชัดเจน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

G.Walker. 1980. **Stirling Engine**. New York : Van Nostrand Reinhold Company Inc.

Colin D. West. 1986 . **Principles and Applications of Stirling Engine**. New York : Van Nostrand Reinhold Company Inc.

Nasrollah Naddaf.2012. **Stirling engine cycle efficiency**.HAMK

Jiří Škorpík. 2012-10. **Losses in Stirling engines**.[online]. Available : http://www.transformacni-technologie.cz/en_ztraty-ve-stirlingovych- motorech.html

Wikipedia. 2014. **Stirling Engine**. [online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine

Pierre Gras. 2009.**Stirling engine**. [online]. Available : http://www.robertstirlingengine.com/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ จากสมการของ เบลล์

W0≈BnPmfV0

Bn = 0.006

Pm = 1 bar

f = 3 hz

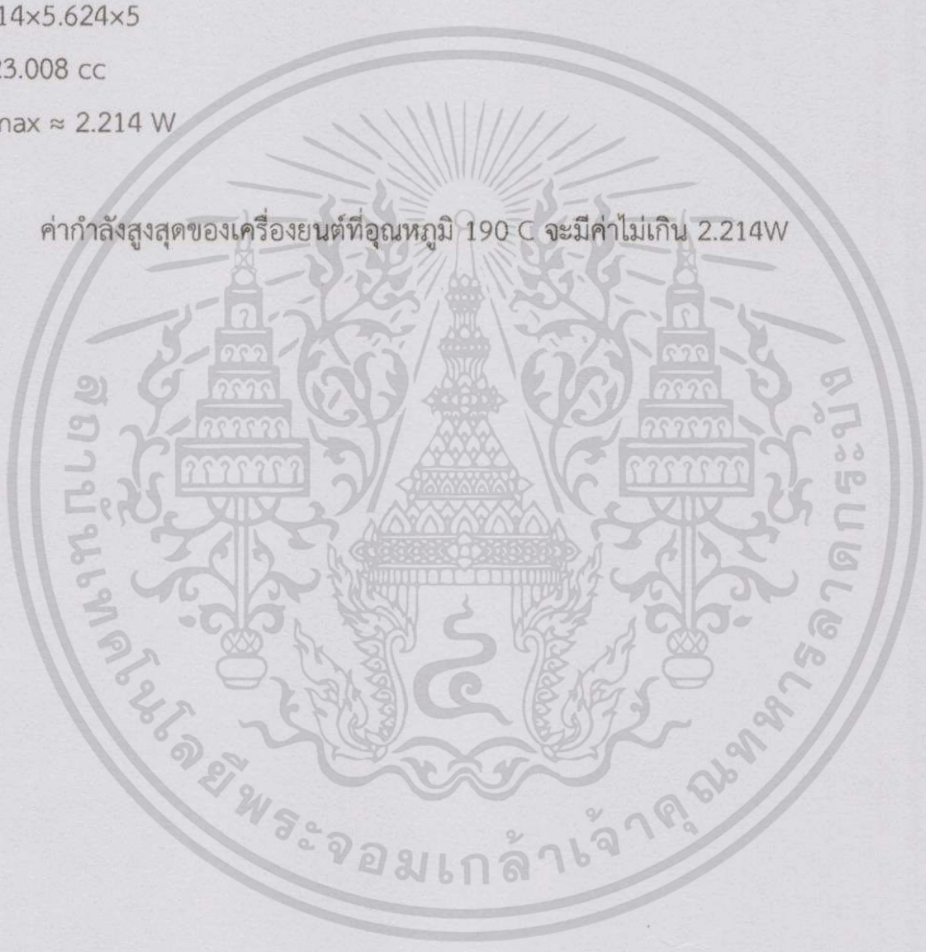
V0 = $\pi D_2^4 l$

= 3.14×5.624×5

= 123.008 cc

Womax ≈ 2.214 W

ค่ากำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิ 190 C จะมีค่าไม่เกิน 2.214W



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้