

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสำหรับพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์

STIRLING ENGINE FOR SOLAR APPLICATION



T104146



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104146
วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสำหรับพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์

STIRLING ENGINE FOR SOLAR APPLICATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสำหรับพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์

STIRLING ENGINE FOR SOLAR APPLICATION

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|------------------|--------------|--------------|----------|
| 1. นายธัญญา | ชวรเชษฐ์ | รหัสประจำตัว | 48010380 |
| 2. นายวิเชียร | สุวรรณพูนลาภ | รหัสประจำตัว | 48010820 |
| 3. นายสุเทพินทร์ | แพงทรัพย์ | รหัสประจำตัว | 48010990 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. คำรึห์ จันทร์แสงสุก)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. ชารูวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสำหรับพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์

นายรัชญา	ชัวร์เชษฐ์	
นายวิเชียร	สุวัฒน์พูนลาภ	
นายสุเทวินทร์	แพงทรัพย์	
อ. คำรึห์	จันทร์แสงสุก	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.จากรู้วัตร	เจริญสุข	อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยพัฒนาการแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น และสามารถเข้ากับแหล่งพลังงานภายนอกได้ เช่น ความร้อนจากการเผาไหม้ หรือพลังงานแสงอาทิตย์ ผลจากการคำนวณด้วยทฤษฎีได้ขนาดกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 85 มม. ความยาวภายใน 88 มม. และดิสเพลสเซอร์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 80 มม. ยาว 53 มม. ทำการทดลองโดยใช้แหล่งความร้อนจากขดลวดความร้อนขนาด 600 วัตต์ โดยกำลังงานที่ให้คิดจากค่าเฉลี่ยที่สภาวะสมดุล จากการทดสอบประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดความเร็วรอบที่ทดสอบเป็น 0.46 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงการเดิม [3] พบว่าการพัฒนาของโครงการนี้เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ 83.58 เปอร์เซ็นต์ และสามารถใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากภายนอกได้ ส่วนการติดตั้งวาล์วผลปรากฏว่าไม่สามารถทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้เนื่องจากปัญหาการรั่วซึมของอากาศที่ลูกสูบกำลังในจังหวะอัดตัว เครื่องมือที่ใช้วัดค่าต่าง ๆ เป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาเอง ได้แก่ เครื่องมือวัดรอบเทอร์โมมิเตอร์ เครื่องมือวัดแรงบิด และอุปกรณ์ควบคุมวาล์ว

STIRLING ENGINE FOR SOLAR APPLICATION

Tanya	Chuworachet	
Wichian	Suwattanapoonlap	
Suthewin	Pangsup	
Damri	Jansangsuk	Advisor
Dr.Jaruwat	Charoensuk	Advisor

Abstract

This project presents a study and development work on Stirling engine for efficiency; improvement by modifying the heat exchanger unit and can be used with external heat source such as combustion, or solar thermal. Using the theory such calculation suggest that the engine; dimensions are as follow; displacer cylinder internal diameter 85mm, displacer cylinder length 88mm, displacer diameter 80mm and length 53mm. Finally, the engine was tested for its performance; the 600W resistance wire was used as a heat source. We have made an average on power output of the engine over entire operating condition and found that, the overall efficiency was 0.46 percent. Compared with the previous development, the efficiency had been improved for about 83.58 percent and it can be used with external heat source. However, the engine with installation of electronic valve failed to operate because of a leakage take place during the compression stroke. The measuring instrument in this project is made by our team which are tachometer, thermometer, torque meter and valve controller.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายๆฝ่ายด้วยกัน บุคคลที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นบุคคลส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีก็คือ อาจารย์คำรึห้ จันทร่แสงสุก และ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่ให้ความเอาใจใส่คอยชี้แนะและช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ก็คือบิดามารดา อันเป็นที่เคารพยิ่งที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนด้านทุนทรัพย์และให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่อีกทั้งยังให้กำลังใจและเอาใจใส่เสมอมาอันหาที่เปรียบมิได้ ทำให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในวันนี้ ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นายชันยา ชูวรเชษฐ์
นายวิเชียร สุวัฒน์พูนลาภ
นายสุเทวินทร์ แพงทรัพย์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงาน.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	4
2.2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	7
2.3 พัฒนาการของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3. การออกแบบและการคำนวณ.....	16
3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้ในการพัฒนา	16
3.2 การออกแบบดิสเพลสเซอร์.....	17
3.3 การออกแบบกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์.....	18
3.4 การออกแบบฉนวนกันความร้อน.....	20
3.5 เครื่องมือวัดรอบ (Tachometer).....	21
3.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer).....	22
3.7 เครื่องวัดแรงบิด (Torque meter).....	23
3.8 กำลังงานบนหัวลูกสูบ (Engine indicated work) [1].....	23
3.9 กำลังงานจริง (Engine power output) [1].....	24
3.10 การประเมินกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	30
4.1 ขั้นตอนการทำงาน.....	30
4.1.1 กระจกสูบดิสเพลสเซอร์.....	30
4.1.2 การทำฉนวนกันความร้อน.....	30
4.1.3 ดิสเพลสเซอร์ (displacer)	34
4.1.4 ขดลวดความร้อน.....	34
4.1.5 อุปกรณ์วัดแรงบิด.....	34
4.1.6 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ.....	35
4.1.7 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (thermometer)	39
4.2 วิธีการทดสอบเครื่องยนต์.....	40
บทที่ 5. ผลการทดลอง.....	41
5.1 บทนำ.....	41
5.2 ผลการทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้กระจกสูบดิสเพลสเซอร์ ชนิดไม่มีครีบบนภายใน.....	41
5.3 ผลการทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้กระจกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบบน ภายใน.....	43
5.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	44
5.4.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องยนต์ก่อนและหลังการพัฒนา.....	44
5.4.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะที่ได้จากการใช้กระจกสูบดิสเพลสเซอร์ ชนิดไม่มีครีบบนและมีครีบบนภายใน.....	45
5.5 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ติดตั้งแล้ว.....	47
บทที่ 6. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	48
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	48
6.1.1 ผลจากการใช้กระจกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีครีบบนภายใน.....	48
6.1.2 ผลจากการใช้กระจกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบบนภายใน.....	49
6.1.3 ผลจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องยนต์ก่อน และหลังการพัฒนา.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
6.1.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะที่ได้จากการใช้กระบอกสูบ คิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีครีบล้อมและมีครีบล้อมภายใน.....	49
6.1.5 ผลของการติดตั้งวาล์ว.....	49
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก. ตารางผลการทดสอบ.....	53
ภาคผนวก ข. วิธีการใช้งานชุดทดสอบ.....	58
ภาคผนวก ค. แบบเขียน และขนาดส่วนประกอบต่างๆของชิ้นงาน.....	63
ภาคผนวก ง. บทความประกอบการนำเสนอโครงงาน.....	75



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินกำลังงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทั้งสามรูปแบบ.....	5
2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิต่ำ.....	7
2.3 วัฏจักรสเตอร์ลิงและวัฏจักรคาร์โนท์.....	8
2.4 การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	10
2.5 การเคลื่อนที่ของคิสเพลสเซอร์และลูกสูบในทางอุดมคติ.....	10
2.6 การเคลื่อนที่ของคิสเพลสเซอร์และลูกสูบที่ต่อเนื่อง.....	11
3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงก่อนการพัฒนา.....	17
3.2 คิสเพลสเซอร์.....	18
3.3 ขนาดของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์และคิสเพลสเซอร์.....	19
3.4 แม่พิมพ์ โครงลวดเสริมความแข็งแรงและฉนวนซีเมนต์ที่ทำเสร็จแล้ว.....	20
3.5 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดสัญญาณ.....	21
3.6 วงจรขยายสัญญาณเทอร์โมคัปเปิล.....	22
3.7 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ทราบค่าและสัญญาณที่แปลงจากเทอร์โมคัปเปิล.....	22
3.8 การทำงานของเครื่องวัดแรงบิด.....	23
3.9 Beale number เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิแหล่งความร้อน [4].....	25
4.1 เพลตตันเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม.	31
4.2 การกลึงคว้านกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์แบบมีคريب.....	31
4.3 กระบอกสูบคิสเพลสเซอร์.....	32
4.4 ตัวยึดน็อตที่กระบอกสูบคิสเพลสเซอร์.....	32
4.5 กระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ที่ประกอบแล้ว.....	32
4.6 โครงลวดเสริมความแข็งแรงสำหรับฉนวนซีเมนต์.....	33
4.7 การหล่อปูนซีเมนต์ในแม่พิมพ์ดินน้ำมัน.....	33
4.8 ฉนวนปูนซีเมนต์ที่ทำเสร็จแล้ว.....	33
4.9 ฉนวนปูนซีเมนต์ที่ทำเสร็จแล้ว.....	34
4.10 อุปกรณ์วัดแรงบิดและการติดตั้ง.....	35
4.11 ชุดอุปกรณ์วัดรอบที่ทำขึ้นเอง.....	36
4.12 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ.....	36
4.13 สัญญาณที่ได้จากแผ่นโรตารีหมุนผ่านลำแสงอินฟราเรด.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 สัญญาณนาฬิกาที่ถูกขยายด้วยกำลัง 5.33 เท่า ด้วยออปแอม.....	37
4.15 สัญญาณนาฬิกาที่ถูกแปลงด้วย threshold comparator ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล.....	37
4.16 สัญญาณดิจิทัลที่ไม่เสถียรที่ได้จาก threshold comparator.....	38
4.17 สัญญาณที่เข้าและออกจากวงจร monostable multivibrator ชนิดทริกซ์ไม่ได้.....	38
4.18 สัญญาณที่เสถียรได้จากวงจร monostable multivibrator.....	38
4.19 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลความเร็วรอบและอุณหภูมิแหล่งความร้อน.....	39
4.20 ตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล.....	39
4.21 ชุดทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	40
5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอสูบคิสเพลสเซอร์ ชนิดไม่มีครีป.....	41
5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอสูบคิสเพลสเซอร์ ชนิดไม่มีครีป.....	42
5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอสูบ คิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีครีป.....	42
5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอสูบคิสเพลสเซอร์ ชนิดมีครีป.....	43
5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอสูบคิสเพลสเซอร์ ชนิดมีครีป.....	44
5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอสูบ คิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีป.....	44
5.7 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก่อนและหลังการพัฒนา.....	45
5.8 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้กระบอสูบคิสเพลสเซอร์ ชนิดมีครีปและไม่มีครีป.....	45
5.9 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้กระบอสูบคิสเพลสเซอร์ ชนิดมีครีปและไม่มีครีป.....	46
5.10 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้กระบอสูบคิสเพลสเซอร์ ชนิดมีครีปและไม่มีครีป.....	46
ข. 1 ตำแหน่งสวิทช์ ฟิวส์ และหลอดไฟแสดงสถานะการทำงาน.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข. 2 จอแสดงผลแสดงข้อความเริ่มโปรแกรม.....	58
ข. 3 จอแสดงผลแสดงโลโก้ของโปรแกรม.....	58
ข. 4 โปรแกรมโหมดแรก.....	59
ข. 5 โปรแกรมโหมดที่สอง.....	59
ข. 6 ตำแหน่งปุ่มควบคุมการทำงานของเครื่อง.....	60
ค. 1 แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ส่วนร้อนแบบไม่มีครีป.....	64
ค. 2 แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ส่วนเย็นพร้อมฐานรองแบบไม่มีครีป.....	65
ค. 3 แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ส่วนร้อนแบบมีครีป.....	66
ค. 4 แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ส่วนเย็นพร้อมฐานรองแบบมีครีป.....	67
ค. 5 แบบเขียนและขนาดของฉนวนกันความร้อน.....	68
ค. 6 แบบเขียนและขนาดของแผ่นประเก็น.....	69
ค. 7 แบบเขียนและขนาดของเอ็น โคคเคอร์.....	70
ค. 8 แบบเขียนและขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งเอ็น โคคเคอร์.....	71
ค. 9 แบบเขียนและขนาดของคิสเพลสเซอร์.....	72
ค. 10 แบบเขียนและขนาดของชุดเซ็นเซอร์.....	73
ค. 11 แบบเขียนและขนาดของฐานรองมอเตอร์.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
D_D	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางดิสเพลสเซอร์
D_P	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางลูกสูบกำลัง
F	ค่าคงที่ในช่วง 0.25-0.35
F_T	แรงจากแขนของเครื่องมือวัดแรงบิดที่กดบนตาชั่งดิจิตอล
L_D	ความยาวดิสเพลสเซอร์
L_{ex}	ความยาวภายในของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์
N	สัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (safety factor)
P	กำลังงาน (watt)
Q	พลังงานความร้อน (Joule)
R	ค่าคงที่จำเพาะของอากาศ = $0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
S	เอนโทรปี (entropy, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
T	แรงบิด ($\text{N} \cdot \text{m}$)
T_C	อุณหภูมิหล่อเย็นของเครื่องยนต์ (cooler temperature, $^{\circ}\text{C}$, K)
T_H	อุณหภูมิแหล่งความร้อนของเครื่องยนต์ (heater temperature, $^{\circ}\text{C}$, K)
V_D	ปริมาตรกวาดของดิสเพลสเซอร์ (displacer swept volume, cm^3)
V_P	ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง (power piston swept volume, cm^3)
V_S	ปริมาตรเปล่าประโยชน์ (dead volume, cm^3)
V_{\max}	$(V_D + V_P)$ คือ ปริมาตรสูงสุดของระบบ (cm^3)
V_{\min}	V_D คือ ปริมาตรต่ำสุดของระบบ (cm^3)
W	งาน (Joule)
X	$\sqrt{(1-\tau)^2 - 2(1-\tau)k_p \cos \alpha + k_p^2}$
Y	$1 + \tau + \frac{4k_s\tau}{1+\tau} + k_p$
d_m	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (mm)
d_{om}	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (mm)
f	รอบของเครื่องยนต์ (Hz)
k_P	V_P/V_D คือ อัตราส่วนปริมาตรกวาด (swept volume ratio)
k_S	V_S/V_D คือ อัตราส่วนปริมาตรเปล่าประโยชน์ (dead volume ratio)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
l_D	ระยะชักดิสเพลสเซอร์ (displacer stroke, mm)
l_P	ระยะชักลูกสูบกำลัง (power piston stroke, mm)
n	จำนวนช่องว่างของแผ่นเอน โค้ดเดอร์ที่ผ่านหัวอ่าน
p_{max}	ความดันสูงสุดในระบบ (Pa)
p_{mir}	ความดันต่ำสุดในระบบ (Pa)
r	V_{max}/V_{min} คือ อัตราส่วนการอัด (compression ratio)
r_T	ความยาวแกนของเครื่องมือวัดแรงบิด
t	ความหนาของผนังกระบอกสูบ (mm)
สัญลักษณ์กรีก (Greek symbols)	
α	มุมระหว่างดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง (phase angle, degree)
η_{th}	ประสิทธิภาพทางความร้อน (thermal efficiency)
$\eta_{overall}$	ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ (overall efficiency)
σ_y	ค่าความแข็งแรงจุดครากของวัสดุ (yield strength, MPa)
τ	T_C/T_H คือ อัตราส่วนอุณหภูมิต่อหน่วยเคลวิน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในด้านการจัดการพลังงานนั้น พลังงานแสงอาทิตย์คือหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญ และเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมดสำหรับการผลิตไฟฟ้า มีหลายวิธีที่จะเปลี่ยนพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์เป็นพลังงานกล วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในเชิงทฤษฎีคือ การใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ความร้อน (heat engine) ชนิดหนึ่ง ซึ่งทำงานแบบระบบปิดตามกฎของเทอร์โมไดนามิก เมื่อได้รับความร้อนจากภายนอก ทำให้แก๊สในระบบมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และเกิดเป็นวัฏจักรการอัดและขยายตัวของแก๊สในระบบ การไหลของแก๊สภายในระบบถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยลูกสูบ ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากพลังงานความร้อนไปเป็นงานทางกล หรือในทางย้อนกลับกัน จากหลักการนี้ ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งใดก็ได้เพื่อขับเคลื่อนเครื่องยนต์ ตัวอย่างเช่น ความร้อนจากการรวมแสงอาทิตย์ การเผาขยะ ความร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือเชื้อเพลิงอื่น ๆ เป็นต้น

ในช่วงต้นของการปฏิวัติอุตสาหกรรมปัญหาเครื่องยนต์ไอน้ำ (Steam Engine) เกิดการระบิดนั้น เป็นปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นเสมอ ทำให้ผู้คนบาดเจ็บและล้มตายเป็นจำนวนมาก เนื่องจากในสมัยนั้น ความรู้ด้านวัสดุศาสตร์ยังไม่ดีพอ จากปัญหานี้ ในปี ค.ศ. 1816 โรเบิร์ต สเตอร์ลิง (Robert Stirling) ได้ประดิษฐ์สิ่งที่เรียกว่า “A New Type of Hot Air Engine with Economizer” ขึ้นมา ซึ่งเครื่องยนต์ชนิดนี้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และเป็นทางเลือกใหม่แทนเครื่องจักรไอน้ำ โดยเครื่องยนต์ชนิดนี้จะสามารถแก้ปัญหาการระเบิดของเครื่องยนต์ได้ นอกจากนั้นเครื่องยนต์ชนิดนี้ยังใช้เชื้อเพลิงน้อย และให้พลังงานมากกว่าเครื่องยนต์ไอน้ำอื่น ๆ ในยุคนั้นอีกด้วย ซึ่งหลังจากนั้นได้มีบุคคลอื่นนำไปพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่ปัญหาหลักที่พบมากที่สุดในยุคนั้นก็คือ วัสดุที่นำมาใช้สร้างเครื่องยนต์นั่นเอง เนื่องจากในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้น ด้านร้อนของเครื่องยนต์ (hot end) จะถูกให้ความร้อน ไปจนถึงอุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อน และมันจะยังคงรักษาอุณหภูมินั้นไว้ เป็นผลให้วัสดุนั้นไม่สามารถเย็นลงในช่วงเวลาระหว่างการเดินเครื่อง ในช่วงที่ โรเบิร์ต สเตอร์ลิง ได้สร้างเครื่องยนต์เครื่องแรกขึ้นมานั้น วัสดุที่เขาได้มีเพียงแค่เหล็กหล่อ (cast iron) เท่านั้น และเมื่อด้านร้อนของเหล็กหล่อถูกทำให้ร้อนจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน

(Oxidize) อย่างรวดเร็ว ผลก็คือ การเกิดรูโหว่บนเหล็กหล่อ ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสาเหตุให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำ ทั้งๆ ที่ปัญหาความยุ่งยากในเรื่องวัสดุยังไม่สามารถแก้ไขได้นั้น เครื่องยนต์สเตอร์ลิงบางส่วนก็ถูกนำไปใช้ในการเดินเครื่องกลเล็ก ๆ (small machines) ปัม (pump) และการหมุนพัดลม (fan) จนกระทั่งในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 ได้มีการสร้างเครื่องยนต์แก๊สโซลีน และเครื่องยนต์ดีเซล และปลายศตวรรษที่ 19 มอเตอร์ไฟฟ้าได้ถูกสร้าง มีการพัฒนาทั้งเครื่องยนต์สันดาปภายในและมอเตอร์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว รวมถึงทั้งสองอย่างมีกำลังงานมากกว่าเครื่องจักรไอน้ำและเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อมีขนาดเท่ากัน ทำให้การพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้หยุดลง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และผลิตได้ง่ายกว่า เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในแบบลูกสูบ ในกรณีที่มีการผลิตจำนวนมากก็จะมีราคาถูกกว่าเช่นกัน และสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานต้นทุนต่ำได้และมีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ [1] ถึงแม้ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอาจจะมีประสิทธิภาพต่ำ แต่ก็มีความปลอดภัยสูงและราคาถูก ซึ่งจุดนี้ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีคุณค่าต่อการใช้ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

สำหรับในประเทศไทย เทคโนโลยีที่เกี่ยวกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงยังไม่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย แต่ก็มีการศึกษาและวิจัยจากมหาวิทยาลัยต่างๆ และหน่วยงานของรัฐ [2] ที่เห็นความสำคัญของการใช้พลังงานทดแทน ซึ่งก็เป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ในประเทศ

โครงการนี้จัดทำขึ้นมาเพื่อศึกษาโครงสร้างและการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากแบบจำลองขนาดเล็ก ศึกษาผลการทดลองที่ได้จากโครงการเดิม [3] ทำการพัฒนาข้อบกพร่อง และทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานเป็นระบบเปิด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ รวมถึงเป็นแนวทางในการศึกษาและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 พัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยปรับปรุงระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องยนต์ให้ดีขึ้น และทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานแบบระบบเปิด โดยการติดตั้งวาล์วและใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมวาล์ว เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มกำลังงานและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

1.2.2 วัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ โดยอุปกรณ์การวัดที่พัฒนาขึ้นเอง ได้แก่ อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ อุปกรณ์วัดแรงบิด และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

1.2.3 ออกแบบชุดรับพลังงานความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ให้สามารถใช้พลังงานความร้อนจากภายนอกได้ เช่น การเผาไหม้ หรือพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์

1.3 ขอบเขตของงาน

โครงการนี้ทำการศึกษาจากโครงการเดิม [3] วิเคราะห์และหาข้อบกพร่อง ที่ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งก็คือ ระบบการแลกเปลี่ยนความร้อน การไหลเวียนของสารทำงานในระบบ และการรั่วไหลของสารทำงาน จากนั้นทำการออกแบบและสร้างกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ (displacer cylinder) ตัวแทนที่อากาศ (displacer) และการทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานแบบระบบเปิดโดยการติดตั้งวาล์วที่ควบคุมการเปิด-ปิดโดยอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับปัญหาการรั่วไหลของสารทำงานนั้นมีข้อจำกัดในการแก้ไขซึ่งขึ้นอยู่กับความประณีตในการทำชิ้นงาน จากนั้นทำการทดลองเครื่องยนต์ที่พัฒนา วัดประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับโครงการเดิม และเปรียบเทียบระหว่างการทำงานระบบปิดกับระบบเปิด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 วิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเครื่องเดิม

ทำการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเดิม เพื่อให้ทราบถึงปัญหาต่าง ๆ ที่ทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำ และนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.4.2 ออกแบบห้องแลกเปลี่ยนความร้อน

โดยใช้ข้อมูลเครื่องยนต์เดิมบางส่วนในการออกแบบและสร้างกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และสามารถใช้กับแหล่งพลังงานความร้อนภายนอกได้ รวมถึงติดตั้งฉนวนกันความร้อนระหว่างกระบอกสูบส่วนร้อนและเย็นเพื่อลดการสูญเสียความร้อน

1.4.3 ออกแบบตัวแทนที่อากาศ (displacer)

คำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคิสเพลสเซอร์จากทฤษฎี และความยาวของคิสเพลสเซอร์ให้สัมพันธ์กับขนาดกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ เพื่อลดปริมาตรเปล่าประโยชน์ (dead volume)

1.4.4 ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมการเปิด-ปิดของวาล์ว

ติดตั้งวาล์วเพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานเป็นแบบระบบเปิด เพื่อช่วยในการระบายความร้อนของเครื่องยนต์ และใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว

1.4.5 วัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ออกแบบ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องยนต์ที่พัฒนากับเครื่องยนต์เดิม โดยเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นเอง คือ อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ อุปกรณ์วัดแรงบิด และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง [1]

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องจักรที่ทำงานตามทฤษฎีวัฏจักรสเตอร์ลิง หรือทฤษฎีที่พัฒนาแล้ว โดยมีสารทำงาน (working fluid) ที่เป็นของไหลที่อัดตัวได้ (compressible fluid) เช่น อากาศ ไฮโดรเจน ฮีเลียม ไนโตรเจน หรือไอน้ำ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นให้ประสิทธิภาพสูง โดยมีมลพิษที่ต่ำ เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน เครื่องยนต์ในยุคแรกนั้นมีขนาดใหญ่แต่ประสิทธิภาพต่ำ อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ผ่านมา ได้มีเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจำนวนไม่น้อย ถูกพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ

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

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ เหมาะกับประเทศที่มีพลังงานแสงอาทิตย์ไม่จำกัด แต่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงนั้น ต้องอาศัยการรวมแสงและการดูดซับพลังงานมาใช้ร่วมกับระบบด้วย

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบและจะเหมาะสมเมื่อ

- 1). ต้องการใช้กับเชื้อเพลิงหลากหลายคุณภาพ
- 2). เครื่องยนต์ต้องการการระบายความร้อนที่ดี
- 3). ต้องการการทำงานที่เงียบ
- 4). ต้องการเครื่องยนต์ที่มีความเร็วรอบต่ำ
- 5). ต้องการเครื่องยนต์มีกำลังงานที่คงที่
- 6). ต้องการเครื่องยนต์มีการเปลี่ยนแปลงกำลังงานที่ช้า
- 7). เครื่องยนต์ต้องเวลาการอุ่นเครื่องนาน

2.1.1 ลักษณะของเครื่องยนต์

ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ต่าง ๆ ได้ถูกประกอบรวมกันเพื่อให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถทำงาน

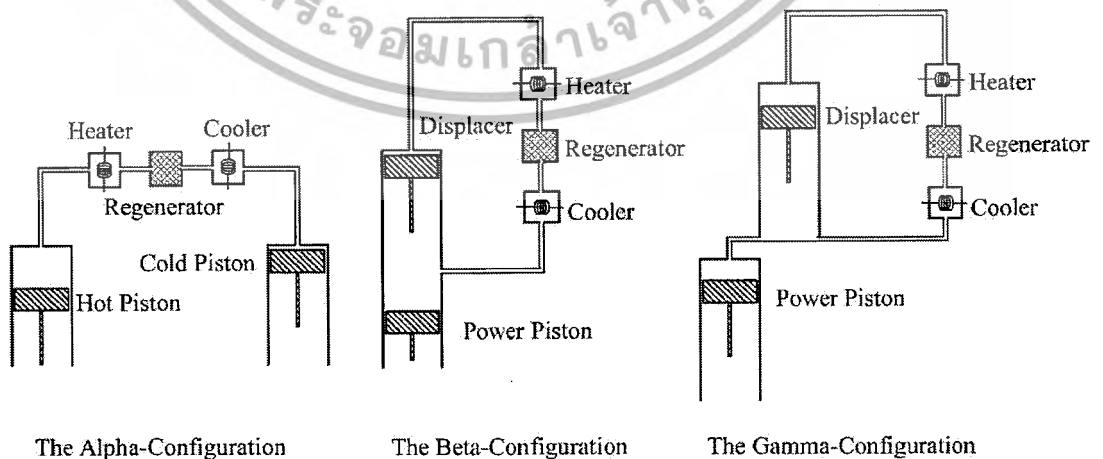
ได้ตามวัฏจักรสเตอร์ลิง ซึ่งวัฏจักรสเตอร์ลิงประกอบด้วย กระบวนการปริมาตรคงที่ ขณะที่มีการไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คัดลอกมาเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้

ของสารทำงานระหว่างส่วนร้อนและเย็น และกระบวนการอุณหภูมิคงที่ ขณะที่มีการรับความร้อนและคายความร้อน ในช่วงที่มีการอัดและขยายตัว กระบวนการอัดและขยายตัวนี้จะเกิดในกระบอกสูบที่มีลูกสูบ (power piston) ส่วนลูกสูบดันแก๊ส (displacer) จะผลักดันแก๊สให้เคลื่อนที่ไปและกลับระหว่าง ส่วนร้อน รีเจนเนอเรเตอร์ และส่วนเย็นที่ปริมาตรคงที่ดังรูปที่ 1 เมื่อดิสเพลสเซอร์เคลื่อนที่ไปยังส่วนเย็น จะดันแก๊สจากส่วนเย็นให้ไหลไปยังส่วนร้อนและเป็นเช่นนี้ในทางกลับกัน ลักษณะของเครื่องยนต์ต่าง ๆ นั้นมีชื่อว่า แอลฟา (alpha) เบต้า (beta) และแกมมา (gamma) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กัน มีวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกที่เหมือนกัน แต่มีการออกแบบที่แตกต่างกัน

1). แบบแอลฟา (alpha) ไม่มีดิสเพลสเซอร์ แต่เป็นสองลูกสูบ ซึ่งเรียกว่า ลูกสูบร้อนและลูกสูบเย็น ลูกสูบเหล่านี้มีการเคลื่อนที่ในลักษณะที่ทำให้มีปริมาตรในระบบคงที่ เมื่อสารทำงานทั้งหมดถูกดันให้อยู่ในกระบอกสูบเดียว ลูกสูบหนึ่งจะหยุด และอีกลูกสูบจะเคลื่อนที่ขยายหรืออัดสารทำงาน งานได้จากการทำงานของลูกสูบร้อน

2). แบบเบต้า (beta) มีดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังในกระบอกเดียวกัน ดิสเพลสเซอร์จะดันสารทำงานระหว่างส่วนร้อนและเย็นของกระบอกสูบให้ผ่าน ฮีตเตอร์ รีเจนเนอเรเตอร์ และคูลเลอร์ ลูกสูบเย็นอยู่ในส่วนเย็นของกระบอกสูบ ทำหน้าที่อัดสารทำงานเมื่อสารทำงานอยู่ในส่วนเย็น และขยายตัวเมื่อสารทำงานเคลื่อนที่ไปยังส่วนร้อน

3). แบบแกมมา (gamma) มีกระบอกสูบแยกกันสำหรับดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง โดยทั้งสองกระบอกสูบเชื่อมต่อถึงกันและมีหลักการการทำงานเช่นเดียวกับแบบเบต้า รูปแบบแกมมาที่มีการส่งกำลังจากทั้งสองลูกสูบไปที่เพลลาข้อเหวี่ยงเดียวกัน มีประสิทธิภาพทางกลที่สูงที่สุดในเชิงทฤษฎี อย่างไรก็ตามกระบอกสูบควรออกแบบให้อยู่ในแนวตั้ง เพื่อลดแรงเสียดทาน



รูปที่ 2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทั้งสามรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 เครื่องยนต์แบบผลต่างอุณหภูมิต่ำ (Low temperature differential engine)

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิต่ำ (ในที่นี้จะใช้คำย่อ LTD แทน ผลต่างอุณหภูมิต่ำ) สามารถทำงานได้เมื่อมีอุณหภูมิระหว่างส่วนร้อนและเย็นของดิสเพลสเซอร์ต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากรูปแบบอื่น ๆ ตรงที่ต้องมีอุณหภูมิระหว่างสองส่วนที่ต่างกันมาก แต่ก็ให้กำลังงานที่มากเช่นกัน

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

ลักษณะบางประการของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบ LTD

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

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบ LTD เหมาะสมที่จะเป็นแบบจำลอง แต่ก็กลายมาเป็นที่สนใจอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของการใช้เป็นต้นกำลัง จากแหล่งพลังงานอุณหภูมิต่ำต่าง ๆ ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส [1] จากการคำนวณโดยใช้วัฏจักรคาร์โนต์แสดงให้เห็นว่า ที่แหล่งพลังงานอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิต่ำ 35 องศาเซลเซียส จะได้ประสิทธิภาพทางความร้อนประมาณ 17.42% ถ้าเครื่องยนต์นี้สามารถสร้างให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนประมาณ 50% จะได้ประสิทธิภาพคาร์โนต์โดยรวมประมาณ 8.71% ถึงแม้ว่าจากการคำนวณเครื่องยนต์นี้มีประสิทธิภาพทางความร้อนที่ต่ำ แต่ก็สามารถใช้ได้กับแหล่งพลังงานความร้อนต่ำที่ฟรีหรือมีราคาถูก และเครื่องยนต์ชนิดนี้สมควรที่จะถูกเลือก ถ้าพิจารณาว่าเครื่องยนต์ชนิดนี้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ เมื่อกำลังงานต่อหน่วยที่ได้จากเครื่องยนต์แบบนี้มีค่าน้อย ดังนั้นวัสดุ น้ำหนักเบาและราคาถูกอย่างเช่น พลาสติก ก็สามารถใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ได้



รูปที่ 2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิต่ำ

2.2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง [1]

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงอากาศร้อน (The Stirling hot air engine) เป็นรูปแบบอย่างง่ายอีกแบบหนึ่งซึ่งใช้สารทำงานประเภทอัดตัวได้ (compressible fluid) เนื่องจากสารทำงานอยู่ในระบบปิด จึงไม่มีปัญหาในเรื่องการปนเปื้อนและสิ้นเปลืองสารทำงาน การถ่ายเทความร้อนให้สารทำงานเป็นสิ่งสำคัญเพื่อการถ่ายเทความร้อนที่ดีสารทำงานควรจะมีอัตราการไหลของมวลสูง และมีความหนืดต่ำ เพื่อลดแรงเสียดทานจากความหนืด (pumping loss) การใช้ความดันในระบบสูง หรือการใช้สารทำงานความหนืดต่ำและความดันสูงคู่กัน สามารถลดความต้องการอัตราการไหลของมวลที่สูงได้เช่นกัน

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีสมรรถภาพในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นงานทางกลได้สูง ในทางทฤษฎีโดยใช้วัฏจักรคาร์โนท์ ขีดจำกัดของการทำงานจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้สร้างเครื่องยนต์ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในช่วง 30% ถึง 40% จะมีอุณหภูมิทำงานระหว่าง 923-1073 K และความเร็วยรอบในช่วง 2000-4000 รอบต่อนาที

2.2.1 วัฏจักรสเตอร์ลิง

วัฏจักรสเตอร์ลิงทางอุณหพลศาสตร์มีสิ่งที่น่าสนใจสามประการ คือ ประการแรกประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรที่มีรีเจนเนอเรเตอร์แบบอุณหพลศาสตร์ มีค่าเท่ากับวัฏจักรคาร์โนท์ ในขณะที่มีการถ่ายเทสารทำงานผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เก็บความร้อนชั่วคราว จะดูดซับและคายความร้อนให้แก่สารทำงาน ดังนั้นจะทำให้มีการรับพลังงานจากภายนอกลดลง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน ดังรูป 2.3

ประการที่สอง ตามวัฏจักรคาร์โนท์ ถ้าแทนกระบวนการไอเซนโทรปิกสองกระบวนการ

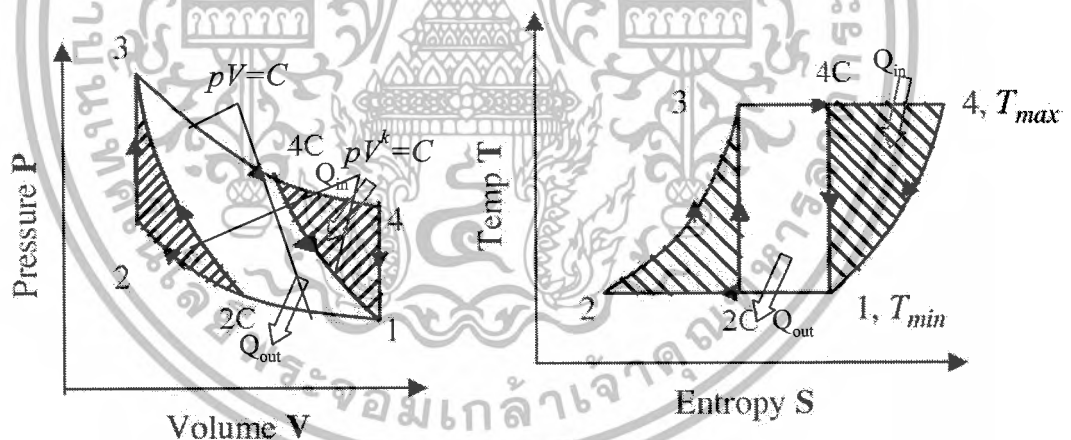
(two isentropic processes) ด้วยกระบวนการปริมาตรคงที่สองกระบวนการ (two constant-volume

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกขาดเห็นาเป็ไซบระยะเขชนดานการค้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

processes) จะเป็นการเพิ่มพื้นที่กราฟ $p-V$ ซึ่งงานจากวัฏจักรสเตอร์ลิงจะเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องใช้ความดันสูงและปริมาตรกวาด (swept volume) มากเหมือนในวัฏจักรคาร์โนท์ จากรูป 2.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวัฏจักรสเตอร์ลิงและวัฏจักรคาร์โนท์ ในช่วง ความดัน ปริมาตร และ อุณหภูมิเดียวกัน พื้นที่ที่แรเงา 2C-2-3 และ 4C-4-1 เป็นพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นจากการแทนกระบวนการ ไอเซนโทรปิกสองกระบวนการ (two isentropic processes) ด้วยกระบวนการปริมาตรคงที่สอง กระบวนการ (two constant-volume processes) กระบวนการไอเซนโทรปิกของวัฏจักรคาร์โนท์ (1-2C และ 3-4C) ถูกขยายออกไปเป็นกระบวนการ 1-2 และ 3-4 ทำให้ได้งานเพิ่มขึ้น ตามส่วนของความร้อนที่ให้และคายออกจากวัฏจักรสเตอร์ลิง

ประการที่สามนี้ถูกค้นพบเมื่อเร็ว ๆ นี้ คือ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แบบ ลูกสูบทั้งหมด โดยทำงานในขอบเขตอุณหภูมิเท่ากัน อัตราส่วนการอัดเท่ากัน มีมวลของสารทำงานในทางอุดมคติเท่ากัน ความดันภายในระบบเท่ากัน และมีกลไกการทำงานที่เหมือนกัน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในทางอุดมคติจะมีประสิทธิภาพทางกลสูงที่สุด ทั้งสามประการนี้แสดงให้เห็นว่าในทางทฤษฎีเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถเทียบได้กับเครื่องยนต์ความร้อน (heat engine) ทุกประเภท



รูปที่ 2.3 วัฏจักรสเตอร์ลิงและวัฏจักรคาร์โนท์

2.2.1.1 การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

กระบวนการการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 1-2 (สารทำงานถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ออกนอกระบบ) หลังจากทีดิสเพลสเซอร์ดันสารทำงานเข้าสู่ส่วนเย็นแล้ว จะอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน (TDC) ดังรูป 2.4 ซึ่งสารทำงานจะถูกทำให้เย็น ที่สภาวะนี้เป็นสภาวะที่ 1 และมีความดันเป็น p_1 ลูกสูบกำลัง จะเริ่มเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่าง (BDC) ไปยังศูนย์ตายบน (TDC) โดยแรง

เฉื่อยจากล้อคูกำลัง (fly wheel) และแรงดูดที่เกิดจากสารทำงานเย็นตัวลง (vacuum) ทำให้สารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาน ไม่นานจะเห็นหน้าไปเซปรีชโยชนนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานถูกอัดจากสภาวะ 1 ไปยัง 2 เข้าใกล้ศูนย์ตายบน (TDC) โดยที่มีอุณหภูมิคงที่ งานที่ให้แก่สารทำงานนี้คือพื้นที่ใต้กราฟของกระบวนการ 1-2

กระบวนการให้ความร้อนที่ปริมาตรคงที่ 2-3 (รีเจนเนอเรเตอร์ถ่ายเทความร้อนให้สารทำงาน) ดิสเพลสเซอร์กำลังเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบน (TDC) ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) และถ่ายเทสารทำงานจากส่วนเย็นมายังส่วนร้อน โดยที่ลูกสูบกำลังยังอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน (TDC) เพื่อรอการเพิ่มความดันจากการขยายตัวของสารทำงาน และดิสเพลสเซอร์จะดันสารทำงานเข้าสู่ส่วนร้อน โดยผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งได้เก็บความร้อนไว้ถูกถ่ายเทให้สารทำงาน ทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นจาก 2 ไปยัง 3 โดยมีปริมาตรคงที่

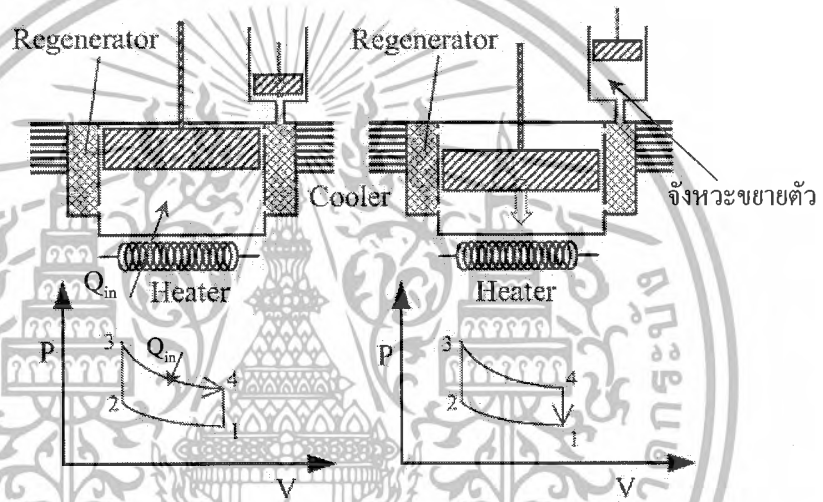
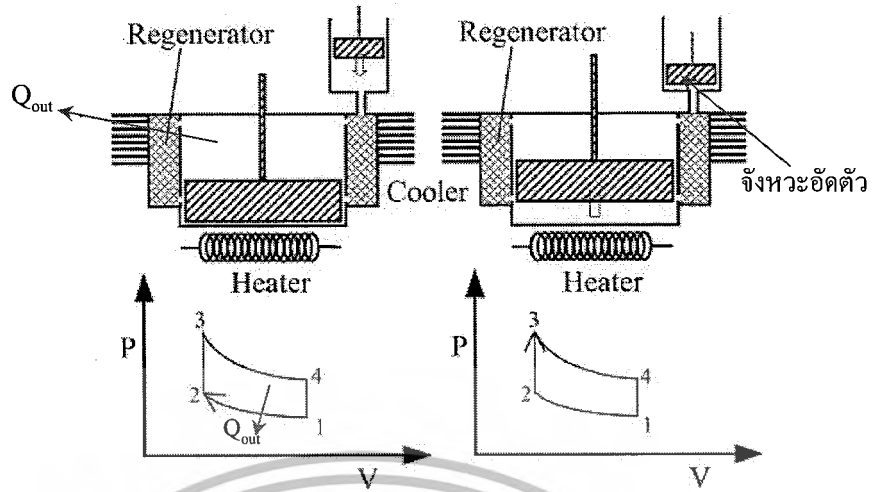
กระบวนการการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 3-4 (ความร้อนจากภายนอกกระบบถ่ายเทให้สารทำงาน) หลังจากดิสเพลสเซอร์ได้ดันสารทำงานทั้งหมดไปยังส่วนร้อน และหยุดอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (BDC) เพื่อให้ความดันในระบบเพิ่มถึงจุดสูงสุดเป็น p_4 ในขณะที่กระบวนการ ที่ 3-4 ยังอยู่ในส่วนร้อน ลูกสูบกำลังเริ่มจะเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบน (TDC) ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) จากความดันที่เพิ่มขึ้น และส่งกำลังไปยังล้อตุนกำลัง (fly wheel) ทำให้ได้กำลังงาน ซึ่งกำลังงานจากจังหวะนี้ จะทำให้เกิดการทำงานจนครบวัฏจักร และงานในส่วนนี้หาได้จาก พื้นที่ใต้กราฟ 3-4

กระบวนการคายความร้อนที่ปริมาตรคงที่ 4-1 (สารทำงานถ่ายเทความร้อนให้รีเจนเนอเรเตอร์) หลังจากที่ถูกสูบกำลังเคลื่อนที่ไปถึงศูนย์ตายล่าง (BDC) และส่งกำลังไปยังล้อตุนกำลัง (fly wheel) แล้ว ก็จะคงอยู่กับที่และพร้อมจะเคลื่อนที่สู่ศูนย์ตายบน (TDC) โดยแรงเฉื่อยจากล้อตุนกำลัง (fly wheel) และแรงดูดที่เกิดจากความดันที่ลดลง ในขณะที่ดิสเพลสเซอร์กำลังเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่าง (BDC) ไปยังศูนย์ตายบน (TDC) และถ่ายเทสารทำงานไปสู่ส่วนเย็น โดยผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ สารทำงานจึงถ่ายเทความร้อนให้รีเจนเนอเรเตอร์ ทำให้ความดันลดลงและเกิดแรงดูด ทำให้อุณหภูมิและความดันของสารทำงานลดลงจากสภาวะ 4 ไป 1 โดยมีปริมาตรคงที่

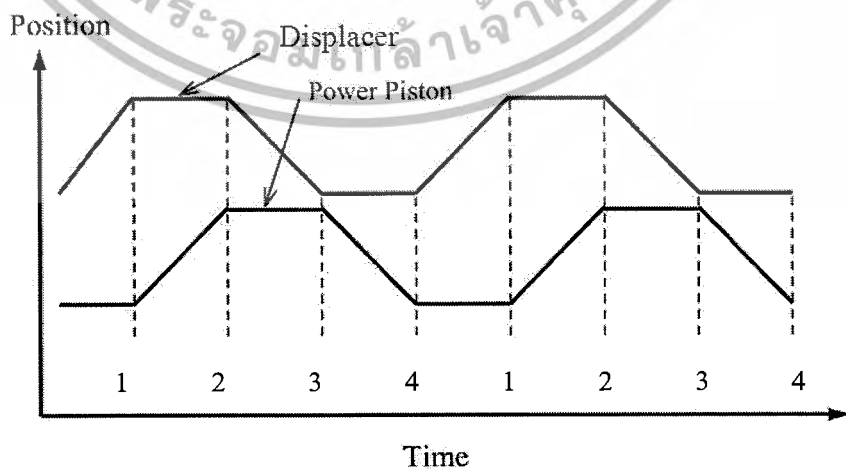
2.2.1.2 แผนภูมิการเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลังและดิสเพลสเซอร์ต้องมีการเคลื่อนที่ต่างกัน และมีการคำนวณระยะห่างระหว่างเวลาและการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้ลูกสูบกำลังและดิสเพลสเซอร์ เคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือข้างหลังในเวลาเดียวกัน ดังนั้นระยะห่างนี้ควรจะเป็น 90 องศา โดยที่ระยะชักของดิสเพลสเซอร์ต้องนำหน้าลูกสูบกำลังประมาณ 90 องศา เพื่อทำหน้าที่ในการถ่ายเทสารทำงานจากกระบอกสูบหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง และหน้าที่ของลูกสูบกำลังคือ การเปลี่ยน การขยายตัวของสารทำงานที่ความดันสูง และการอัดตัวที่อุณหภูมิต่ำ ไปสู่การเคลื่อนที่โดยผ่านเพลลาข้อเหวี่ยงและล้อตุนกำลัง (fly wheel) รูป 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแกมมา และรูป 2.6 แสดงการเคลื่อนที่ที่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

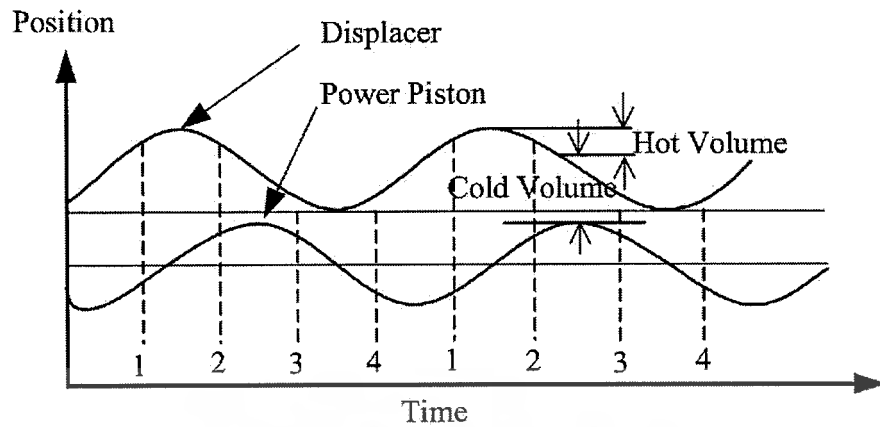


รูปที่ 2.4 การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



รูปที่ 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของดิสเพลสเซอร์และลูกสูบในทางอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้จัดทำเห็นว่าไปะประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงการเคลื่อนที่ของดิสเพลสเซอร์และลูกสูบที่ต่อเนื่อง

2.2.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของวัฏจักรสเตอร์ลิงในทางอุดมคติ [4]

จากรูป 2.3 และการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในหัวข้อ 2.2.1.1 สามารถหาสมการสำหรับวัฏจักรสเตอร์ลิงทางอุดมคติได้ดังนี้

ก). กำหนดข้อมูลอ้างอิงในสถานะที่ 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 สมมติให้สารทำงานเป็นก๊าซอุดมคติ ดังนั้น จะมีสมการตามกฎของก๊าซ คือ $V_1 = RT_1/p_1$

1). กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 1-2 ในกระบวนการนี้สารทำงานถ่ายเทความร้อนออกนอกระบบจนมีอุณหภูมิต่ำที่สุด งานที่กระทำต่อสารทำงานมีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทออกจากระบบ เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน และเอนโทรปีลดลง

$$p_2 = p_1 V_1/V_2 = p_1 r; T_2 = T_1 = T_{\min} \quad (2.1)$$

$$\text{ความร้อนที่ถ่ายเท (Q) = งานที่ให้ (W)} \quad W = p_1 V_1 \ln(1/r) = RT_1 \ln(1/r) \quad (2.2)$$

$$\text{การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี} \quad S_2 - S_1 = R \ln(1/r) \quad (2.3)$$

2). กระบวนการให้ความร้อนที่ปริมาตรคงที่ 2-3 ในกระบวนการนี้เป็นการให้ความร้อน

โดยรีเจนเนอเรเตอร์ ทำให้อุณหภูมิเพิ่มจาก T_{\min} เป็น T_{\max} ซึ่งไม่มีงานเกิดขึ้น สารทำงานมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนโทรปีและพลังงานภายในเพิ่มขึ้น

$$p_3 = p_2 T_3/T_2 = p_2 \tau; V_3 = V_2 \quad (2.4)$$

ความร้อนที่ถ่ายเท $Q = C_V(T_3 - T_2)$ (2.5)

งานที่ให้ (W) = 0

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี $(S_3 - S_2) = C_V \ln(1/\tau)$ (2.6)

3). การขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 3-4 ในกระบวนการนี้มีการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ระบบ มีงานเกิดขึ้นจากการขยายตัวของสารทำงาน ซึ่งเท่ากับปริมาณความร้อนที่ได้รับ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในแต่มีการเพิ่มขึ้นของเอนโทรปี

$$p_4 = p_3 V_3/V_4 = p_3 r; T_4 = T_3 = T_{\max} \quad (2.7)$$

ความร้อนที่ถ่ายเท (Q) = งานที่ได้ (W) $W = p_3 V_3 \ln(r) = RT_3 \ln(r)$ (2.8)

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

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

$$p_1 = p_4 T_3/T_2 = p_1 \tau; V_1 = V_4 \quad (2.10)$$

ความร้อนที่ถ่ายเท $Q = C_V(T_1 - T_4)$ (2.11)

งานที่ได้ (W) = 0

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี $(S_1 - S_4) = C_V \ln(\tau)$ (2.12)

ในกระบวนการการถ่ายเทความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับสารทำงานในกระบวนการ 2-3 จะถูกดูดซับคืนในกระบวนการ 4-1 เมื่อไม่มีการสูญเสียพลังงานจากสารทำงานหรือรีเจนเนอเรเตอร์จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความร้อนที่ให้แก่ระบบทั้งหมด (ที่ } T_{\min}) = RT_3 \ln r \quad (2.13)$$

$$\text{ความร้อนที่ออกจากระบบทั้งหมด (ที่ } T_{\max}) = RT_1 \ln(1/r) \quad (2.14)$$

$$\text{และ ประสิทธิภาพทางความร้อน } (\eta_{th}) \quad \eta_{th} = (Q_{34} - Q_{12})/Q_{34}$$

$$= (RT_3 \ln r - RT_1 \ln(1/r))/RT_3 \ln r$$

$$\eta_{th} = 1 - \tau \quad (2.15)$$

ค่าที่ได้นี้ เทียบกับประสิทธิภาพคาร์โนท์ในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน

2.3 พัฒนาการของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง [1]

2.3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในยุคแรก

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ชนิดแรกที่สร้างตามวัฏจักร regenerative โดยโรเบิร์ต สเตอร์ลิง (Robert Stirling) ในปี ค.ศ. 1816 (patent no. 4081) เครื่องยนต์ถูกสร้างหลากหลายรูปแบบหลายขนาด จนกระทั่งถึงปลายศตวรรษ เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีความปลอดภัยและง่ายต่อการใช้งาน ทำงานได้เงียบ ใช้เชื้อเพลิงชนิดใดก็ได้ สะอาดและมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องจักรไอน้ำ จึงได้รับความนิยมอย่างมาก แต่เครื่องยนต์เหล่านี้มีขนาดเล็กและให้กำลังงานที่ต่ำ (100W ถึง 4kW)

ในปี ค.ศ. 1853 John Ericsson ได้สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดใหญ่สำหรับเรือเดินสมุทร ซึ่งมี 4 ลูกสูบ เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.2 เมตร ระยะชัก 1.5 เมตร ให้กำลังงานสุทธิ (break power) 220 kW ที่ 9 รอบต่ออนาที และยุคแรกของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้หยุดชะงักไป โดยพัฒนาการที่รวดเร็วของเครื่องยนต์สันดาปภายในและมอเตอร์ไฟฟ้า

2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ในยุคแรก (Solar-powered Stirling engine)

ในปี ค.ศ. 1864, Ericsson ได้สร้างเครื่องยนต์อากาศร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (a solar-powered hot air engine) โดยการสะท้อนแสงอาทิตย์ไปที่กระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ (hot-end)

Jordan และ Ibele ได้รายงานไว้ว่า ในระหว่างปี ค.ศ. 1864-1870 Ericsson ได้ใช้รางพาราโบลาให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนกับไอน้ำ เพื่อใช้ขับเคลื่อนเครื่องยนต์ และในปี ค.ศ. 1870 Ericsson ได้ประยุกต์ใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับพลังงานแสงอาทิตย์

Spenser ได้รายงานว่าในปี ค.ศ. 1872 Ericsson ได้สร้างเครื่องยนต์อากาศยานระบบเปิด (open-cycle hot-air engine) โดยใช้กระจกรวมแสงทรงกลม เครื่องยนต์นี้เป็นเครื่องยนต์อากาศยานพลังงานแสงอาทิตย์เครื่องแรก ซึ่งสามารถทำงานได้ 420 รอบต่อนาที ในตอนเที่ยงของวันที่ฟ้าปลอดโปร่งในเมืองนิวยอร์ก

Meinel AB. และ Meinel MP. มีความเห็นกับข้อสรุปของ Ericsson ว่าเครื่องยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ มีความคุ้มค่าเฉพาะในพื้นที่ห่างไกล ซึ่งมีแสงอาทิตย์มากและยังมีราคาสูงกว่าเครื่องยนต์ทั่วไปถึง 10 เท่า เครื่องยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ในยุคแรกนั้นบางเครื่องก็มีขนาดเล็ก ซึ่ง Reader และ Hooper ได้รายงานไว้ในปี ค.ศ. 1908 ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์เหมาะกับระบบการปั้มน้ำเท่านั้น

2.3.3 ยุคที่สองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ยุคที่สองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเริ่มต้นประมาณปี ค.ศ. 1937 โดย The Philips Research Laboratory, Eindhoven, Holland ที่นำเทคโนโลยีขั้นสูงมาพัฒนา และต่อเนื่องมาจนกระทั่งปัจจุบัน ในขณะที่นั้นได้พัฒนาเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนขนาดเล็กสำหรับวิทยุและเครื่องมือสำหรับใช้ในพื้นที่ห่างไกล

ปัจจุบันนี้ กุญแจแห่งความสำเร็จของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือ เรื่องของวัสดุ ทีม The Philips research ได้ใช้วัสดุชนิดใหม่เช่น สแตนเลสสตีล (stainless steel) และสิ่งสำคัญอีกอย่างคือ ความรู้ในเรื่องความร้อนและคุณสมบัติของของไหลที่ดีกว่าในยุคแรก ซึ่งกำลังงานต่อหน่วยของเครื่องยนต์ขนาดเล็ก “102C” ในปี ค.ศ. 1952 มีกำลังมากกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรุ่นเก่าถึง 30 เท่า

การพัฒนาต่อไปของ Philips และห้องทดลองต่าง ๆ ยังคงต้องการแหล่งพลังงานใหม่ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงของยุคนี้

2.3.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ในยุคที่สอง (Solar-powered Stirling engine)

ระหว่างปี ค.ศ. 1950-1955 Ghai และ Khanna ได้วิจัยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบบเปิด โดยใช้จานพาราโบลิกสะท้อนแสง ในประเทศอินเดีย พลังงานแสงอาทิตย์จะถูกสะท้อนไปที่จุดโฟกัส ซึ่งเป็นส่วนรับความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง แต่ก็พบปัญหาจากการสูญเสียความร้อน Jordan และ Ibele ได้กล่าวถึง เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 100W สำหรับการปั้มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 กระทรวงพลังงานร่วมกับมหาวิทยาลัยศิลปากร [2] ได้ทำการวิเคราะห์ศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าระบบความร้อนแบบรวมแสง (concentrating solar power technology, CSP) ซึ่งแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 กิจกรรมหลักได้แก่ การพัฒนาแผนที่ความเข้มรังสีตรง การจำลองการทำงานระบบผลิตไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์ และการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้า สำหรับกิจกรรมแรกใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยาภาคพื้นดินในการพัฒนาแผนที่ความเข้มรังสีตรงให้ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย กิจกรรมที่ 2 ใช้พื้นที่ในจังหวัดอุบลราชธานีสำหรับการจำลองการทำงานระบบผลิตไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์ เพราะเป็นจังหวัดที่ได้รับรังสีตรงค่อนข้างสูง และทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 10 MW 3 ระบบ ได้แก่ ระบบรางพาราโบลา ระบบหอคอย และระบบจานพาราโบลา ร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง กิจกรรมที่ 3 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของทั้ง 3 ระบบ ทำการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในรูปของ levelized electricity cost (LEC) พบว่าระบบรางพาราโบลามีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุด

2.4.2 ในปี ค.ศ. 2003 Kongtragool และ Wongwises [1] ได้รวบรวมข้อมูลและศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำไปสู่การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิต่ำ ที่ใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ผลจากการศึกษาพบว่า ในอนาคต เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิต่ำที่มีสารทำงานเป็นอากาศจะมีความน่าสนใจมากขึ้น โดยเฉพาะเครื่องยนต์รูปแบบเกมมาทำงานแบบสองลูกสูบในแนวตั้ง

2.4.3 ในปี ค.ศ. 2005 Kongtragool และ Wongwises [5] ได้ศึกษาการหาค่ากำลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเกมมาที่ทำงานแบบผลต่างอุณหภูมิต่ำจากการคำนวณ ผลจากการศึกษาพบว่าสูตรที่เหมาะสมในการคำนวณ คือ สูตรความดันเฉลี่ย (Mean pressure power formula) ที่สามารถประมาณค่ากำลังงานได้

บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณ

3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้ในการพัฒนา

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้ในการพัฒนาคือเครื่องยนต์จากโครงการเดิม [3] ซึ่งเป็นรูปแบบแกมมา (gamma) จากข้อมูลของโครงการเดิมทำให้ทราบปัญหาที่จะต้องทำการปรับปรุง คือ การถ่ายเทความร้อน และการรั่วซึมของสารทำงาน ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดังกล่าว ในโครงการนี้จึงทำการพัฒนาการแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

3.1.1 ข้อมูลของเครื่องยนต์

1). ลูกสูบกำลัง (power piston)

เส้นผ่านศูนย์กลาง

$$D_p = 51\text{mm}$$

ระยะชัก (stroke)

$$l_p = 45\text{mm}$$

จะได้ปริมาตรกวาด (swept volume)

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

$$V_p = 92\text{cm}^3$$

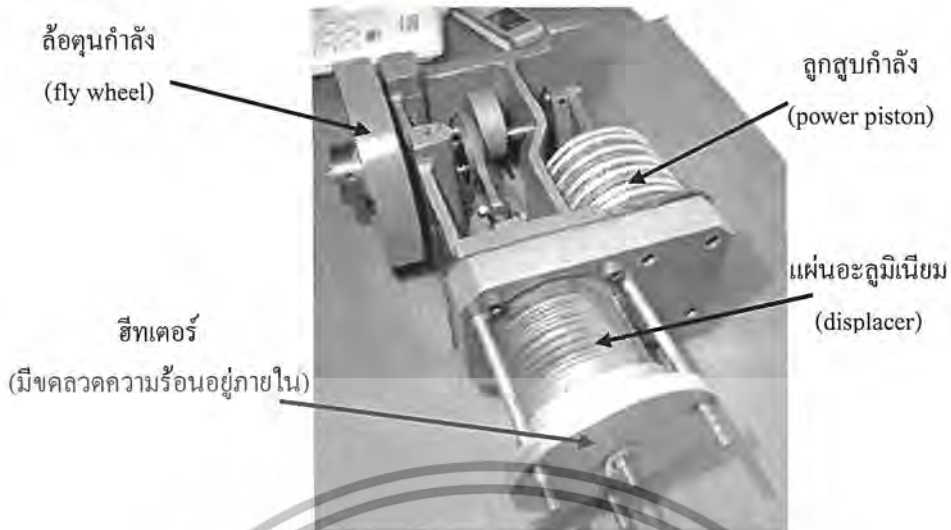
2). ดิสเพลสเซอร์ (displacer)

ระยะชัก (stroke)

$$l_D = 25\text{mm}$$

จากรูป 3.1 แสดงให้เห็นดิสเพลสเซอร์แบบเดิมที่มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกันหลายแผ่น ซึ่งลักษณะนี้จะทำให้ปริมาตรกวาด (swept volume) ของดิสเพลสเซอร์น้อย หากจะให้เครื่องยนต์ทำงานได้ต้องใช้อุณหภูมิสูง เพื่อให้แก๊สขยายตัวได้มากพอที่จะไปดันลูกสูบกำลัง ดังนั้นเครื่องยนต์เดิมจึงมีขีดลดความร้อนติดอยู่ภายใน

ปัญหาอีกประการหนึ่งคือ การรั่วซึมของอากาศที่ก้านสูบดิสเพลสเซอร์และฟิวด์ความถี่ระหว่างกระบอกสูบและลูกสูบกำลัง จึงแก้ไขการรั่วซึมเฉพาะที่ก้านสูบดิสเพลสเซอร์เท่านั้น เพราะหากต้องการปรับปรุงลูกสูบกำลัง ต้องทำชิ้นงานใหม่และต้องใช้ทักษะความประณีตสูงเพื่อให้ได้ฟิวด์ความถี่และแรงเสียดทานน้อยที่สุด



รูปที่ 3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงก่อนการพัฒนา

3.2 การออกแบบดิสเพลสเซอร์

ปริมาตรกวาด (swept volume) ของดิสเพลสเซอร์สามารถหาได้จากการคำนวณกราฟ อุณหภูมิ-ความดัน (p - V diagram) โดยการกำหนดอัตราส่วนความดัน $p_{max}/p_{min} = 2$ เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีความดันในระบบแตกต่างกันประมาณสองเท่า [4] และคำนวณหาอัตราส่วน ปริมาตรกวาด (swept volume ratio, V_D/V_p) เมื่อทราบปริมาตรลูกสูบกำลัง และอีกวิธีก็คือการ กำหนดอัตราส่วนปริมาตรกวาด โดยมีค่าประมาณ 1.5 ขึ้นไป [6]

ดังนั้นปริมาตรกวาด (swept volume) ของดิสเพลสเซอร์ ที่ใช้ในการทดลองนี้ จึงใช้การ กำหนดอัตราส่วนปริมาตรกวาดเท่ากับ 1.5 และสามารถคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดิสเพลสเซอร์ได้ดังนี้

ข้อมูลของเครื่องยนต์

ระยะชักของดิสเพลสเซอร์ $l_D = 25mm$

ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง $V_p = 92cm^3$

อัตราส่วนปริมาตรกวาด $\frac{V_D}{V_p} = 1.5$

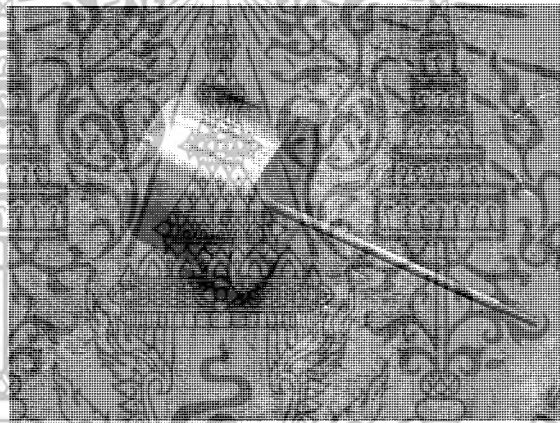
ปริมาตรกวาดของดิสเพลสเซอร์คือ $V_D = 138cm^3$

เส้นผ่านศูนย์กลางของดิสเพลสเซอร์หาได้จาก

$$D_D = \sqrt{\frac{V_D}{\pi d_D/4}} \quad (3.1)$$

$$D_D = 84 \text{ mm}$$

ดังนั้น ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของดิสเพลสเซอร์เท่ากับ $D_D = 84 \text{ mm}$ แต่ความยาวของกระบอกดิสเพลสเซอร์จะขึ้นกับการออกแบบห้องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อลดช่องว่างในกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (dead volume) ให้น้อยที่สุด



รูปที่ 3.2 ดิสเพลสเซอร์

3.3 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูป 2.4 และหัวข้อ 2.2.1.1 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่พัฒนานี้ คือ กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่รับความร้อนจากภายนอก ส่งต่อให้สารทำงานภายในซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการขยายตัวของสารทำงาน และรับความร้อนจากสารทำงาน ถ่ายเทออกจากระบบซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการอัดตัวของสารทำงาน

ดังนั้นเมื่อคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของดิสเพลสเซอร์ได้ 84 mm จึงกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ประมาณ 85 mm เพื่อให้มีช่องว่างในการถ่ายเทอากาศ แต่ต้องมีขนาดไม่ใหญ่เกินไป เพราะจะเป็นการเพิ่ม dead volume ซึ่งส่งผลต่อกำลังงานของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่ใช้ทำกระบอบสูบคือเหล็กเหนียว โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนและใช้วงแหวนที่ทำจากซีเมนต์คั่นกลาง เพื่อลดการนำความร้อนจากส่วนร้อนไปส่วนเย็น ดังรูป 3.3 ขั้นตอนการทำคือการใช้เพลาดันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ดังรูป 3.4 กลึงคว้านให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 85 mm ลึกประมาณ 25 mm และความหนาของกระบอบสูบหาได้จากสมการ [4]

$$\sigma_y = \frac{p_{\max} d_{in}}{2t} \quad (3.2)$$

จากตารางคุณสมบัติของวัสดุ ใช้ค่าความแข็งแรงจุดคราก (yield strength) ของเหล็ก $\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ และกำหนดให้สัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (safety factor, N) เท่ากับ 7 เมื่อพิจารณาผลจากความดันภายในและอุณหภูมิ ดังนั้น ค่าความแข็งแรงจุดครากในการออกแบบ

$$\sigma'_y = \frac{\sigma_y}{N} = \frac{250 \text{ MPa}}{7}$$

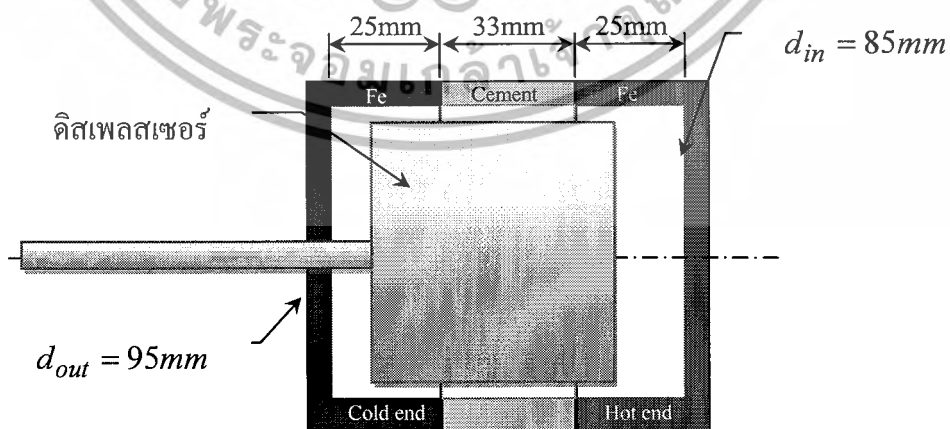
$$\sigma'_y = 35.7 \text{ MPa}$$

จะได้ความหนาของผนังกระบอบสูบ

$$t = \frac{p_{\max} d_{in}}{2\sigma'_y}$$

$$t = 0.241 \text{ mm}$$

แต่เพื่อความแข็งแรงในการใช้งานจึงกำหนดความหนาเป็น 10 mm



รูปที่ 3.3 ขนาดของกระบอบสูบดิสเพลสเซอร์และดิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบฉนวนกันความร้อน

กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ถูกออกแบบโดยแยกเป็นสองส่วน และใช้วัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อนคั่นกลางเพื่อลดการนำความร้อนจากส่วนร้อนไปยังส่วนเย็น วัสดุที่เลือกใช้คือซีเมนต์ โดยกำหนดความยาวของซีเมนต์ไว้ที่ 33 mm ดังนั้น ความยาวของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์คือ

$$L_{ex} = 25 + 25 + 33$$

$$L_{ex} = 88\text{mm}$$

และระยะซัทช์ของดิสเพลสเซอร์เป็น 25 mm ดังนั้น ความยาวของกระบอกดิสเพลสเซอร์ประมาณ

$$L_D = L_{ex} - l_D$$

$$L_D = 88 - 25$$

$$L_D = 63\text{mm}$$

กำหนดระยะเผื่อภายในตามแนวแกนประมาณ 10mm

ดังนั้นความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ $L_D = 53\text{mm}$



รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์ โครงลวดเสริมความแข็งแรงและฉนวนซีเมนต์ที่ทำเสร็จแล้ว

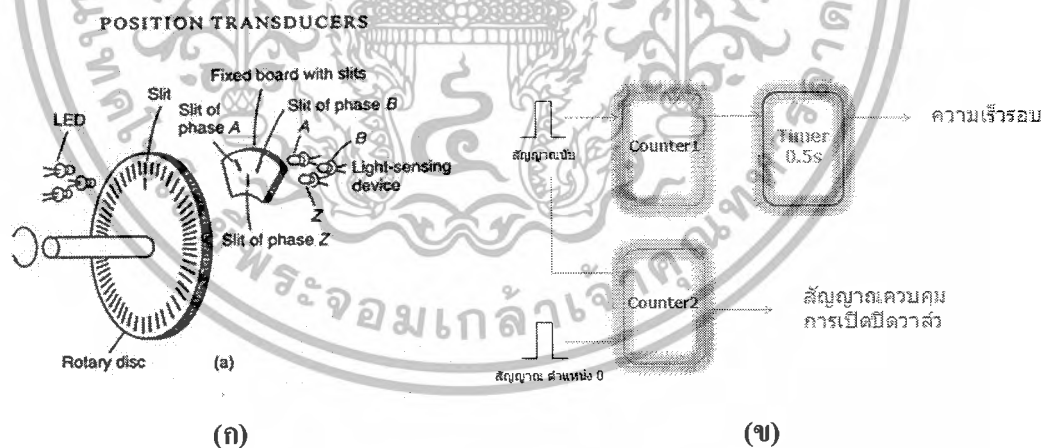
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกระบอกส่วนหัวและท้ายไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลง การลดการนำความร้อนจากส่วนร้อนไปยังส่วนเย็น ทำได้โดยเพิ่มความยาวของฉนวนซึ่งทำให้ dead volume ในระบบเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น การลด dead volume ต้องเพิ่มความยาวของคิสเพลสเซอร์ จึงกล่าวได้ว่าความยาวของคิสเพลสเซอร์ขึ้นกับความยาวของฉนวน ดังรูป 3.3

3.5 เครื่องมือวัดรอบ (Tachometer)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำขึ้นเอง โดยอาศัยหลักการนับสัญญาณแสงอินฟราเรดที่ตัวรับแสงรับได้ใน ช่วงเวลาที่ตั้งไว้ เนื่องจากมีช่องว่างผ่านลำแสง ดังรูป 3.5 (ก) แพลนโรตารีที่ออกแบบไว้มีช่องว่าง 180 ช่องต่อหนึ่งรอบ จากรูป 3.5 (ข) แสดงการทำงานของวงจร ซึ่งจะนับจำนวนช่องว่างที่ผ่าน หัวอ่านอินฟราเรดในเวลาที่ตั้งโปรแกรมไว้ คือ จำนวนทุก ๆ 0.5 วินาที แล้วนำมาคำนวณตาม สมการ (18)

$$RPM = \frac{n \times 2 \times 60}{180} \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.5 (ก) ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดสัญญาณ

(ข) แผนภูมิการนับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดรอบ

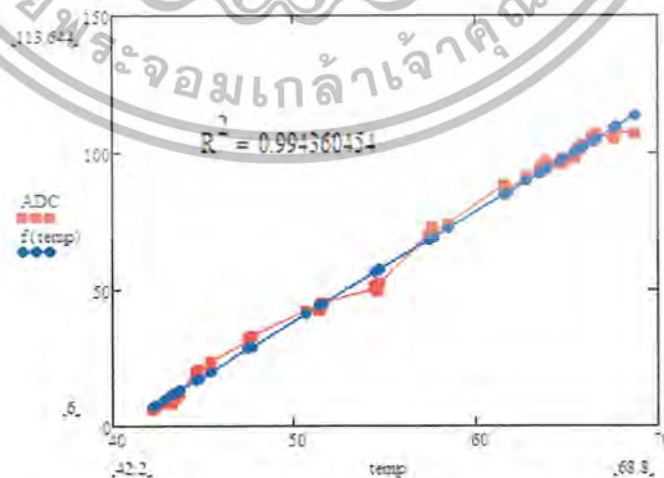
3.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้คือ เทอร์โมคัปเปิล รูป 3.6 เป็นการขยายสัญญาณของเทอร์โมคัปเปิล โดยใช้ออปแอมป์ที่มีกำลังขยาย 101 เท่า จากนั้นทำการแปลงสัญญาณจากขนาดออกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยทำการเปรียบเทียบค่า (calibration) ที่ได้จากออปแอมป์กับอุณหภูมิที่ทราบค่าหาความสัมพันธ์ได้ดังรูป 3.7 กราฟจุดวงกลมคือข้อมูลจริงที่ได้จริงจากการเปรียบเทียบค่า กราฟจุดสี่เหลี่ยมเป็นค่าที่ได้จากการปรับแก้ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) โดยใช้โปรแกรม MathCAD มีสมการเป็น

$$f(\text{Temp}) = (4.008 \times \text{Temp}) - 162.113 \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.6 วงจรขยายสัญญาณเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ทราบค่าและสัญญาณที่แปลงจากเทอร์โมคัปเปิล

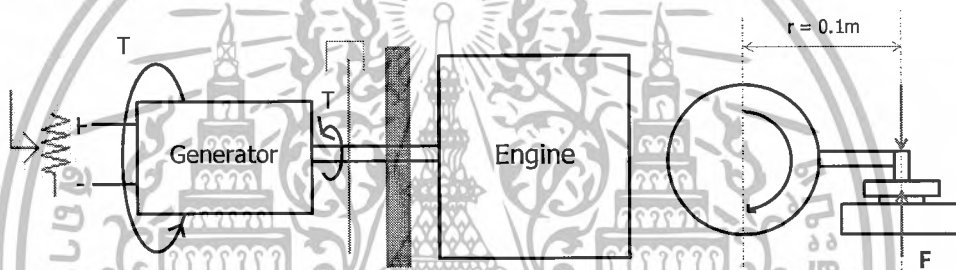
จุดสี่เหลี่ยมคือข้อมูลจริง จุดวงกลมคือข้อมูลที่ปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 เครื่องวัดแรงบิด (Torque meter)

การเปลี่ยนแปลงภาระของเครื่องยนต์โดยใช้การหน่วงจากสนามแม่เหล็กของเจนเนอเรเตอร์ ทำให้ได้ควมวงจรดังรูป 3.8 โดยต่อกับเจนเนอเรเตอร์กับตัวต้านทานปรับค่าได้ จะเป็นผลให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในเจนเนอเรเตอร์ ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนภาระที่กระทำกับเครื่องยนต์ได้ และเกิดโมเมนต์ต้านการหมุนที่เจนเนอเรเตอร์ สามารถหาค่าโมเมนต์ได้โดยการต่อแวนที่เจนเนอเรเตอร์ ดังรูป 3.8 แล้วให้ตกลงบนตาชั่ง ค่าที่อ่านได้บนตาชั่งซึ่งเป็นหน่วยของมวล แปลงให้เป็นหน่วยของแรงแล้วคูณกับความยาวแขนจะได้แรงบิดของเครื่องยนต์ ดังสมการ

$$T = F_T \times r_T \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.8 การทำงานของเครื่องวัดแรงบิด

3.8 กำลังงานบนหัวลูกสูบ (Engine indicated work) [1]

3.8.1 Schmidt formula

ถือว่าเป็นสมการคลาสสิกที่นิยมใช้กันมาก สามารถใช้ประมาณสมรรถนะของเครื่องยนต์ได้ดีพอสมควร แต่ก็ยังเป็นการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างเป็นอุดมคติเนื่องจากการวิเคราะห์การอัดและขยายตัวเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ (isothermal) ในการทำงานจริงของเครื่องยนต์ที่มีรอบการทำงานตั้งแต่ 1,000 รอบต่อนาทีขึ้นไป กระบวนการอัดและขยายตัวจะเป็นแบบ adiabatic มากกว่า isothermal อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีของ Schmidt ยังสามารถใช้เพื่อประเมินการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้เป็นอย่างดี

ทฤษฎีของ Schmidt เป็นสมการแบบแม่นยำตรง (exact expression) เพื่อใช้คำนวณหา กำลังงานบนหัวลูกสูบต่อหนึ่งรอบของเครื่องยนต์ สมการคำนวณสำหรับรูปแบบแกมมาคือ

$$W_{Schmidt} = \pi(1-\tau)p_{\max}V_D \frac{k_p \sin \alpha}{Y + \sqrt{Y^2 - X^2}} \sqrt{\frac{Y-X}{Y+X}} \quad (3.6)$$

$$X = \sqrt{(1-\tau)^2 - 2(1-\tau)k_p \cos \alpha + k_p^2} \quad (3.7)$$

$$Y = 1 + \tau + \frac{4k_s\tau}{1+\tau} + k_p \quad (3.8)$$

เนื่องจากว่า การใช้ความดันเฉลี่ยในการคำนวณจะเหมาะสมกว่าใช้ความดันสูงสุด จากสมมติฐานของ Schmidt สามารถคำนวณหาความดันเฉลี่ยได้จากสมการ

$$p_{mean} = p_{\max} \sqrt{\frac{Y-X}{Y+X}} \quad (3.9)$$

แทนค่าสมการ (3.9) ในสมการ (3.6) จะได้สมการที่ง่ายต่อการคำนวณ

$$W_{Schmidt} = \pi(1-\tau)p_{mean}V_D \frac{k_p \sin \alpha}{Y + \sqrt{Y^2 - X^2}} \quad (3.10)$$

3.8.2 West formula

West ได้เสนอสมการที่ง่ายต่อการคำนวณยิ่งขึ้น แต่ก็มีผลคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับสมการ (23) ใดๆก็ตามสมการนี้เป็นที่นิยมมากกว่าเพราะง่ายต่อการคำนวณ

$$W_{West} = \left(\frac{\pi p_{mean}}{2}\right) \left(\frac{V_D V_P}{V_D + \frac{V_P}{2} + V_S}\right) \left(\frac{T_H - T_C}{T_H + T_C}\right) \sin \alpha \quad (3.11)$$

3.9 กำลังงานจริง (Engine power output) [1]

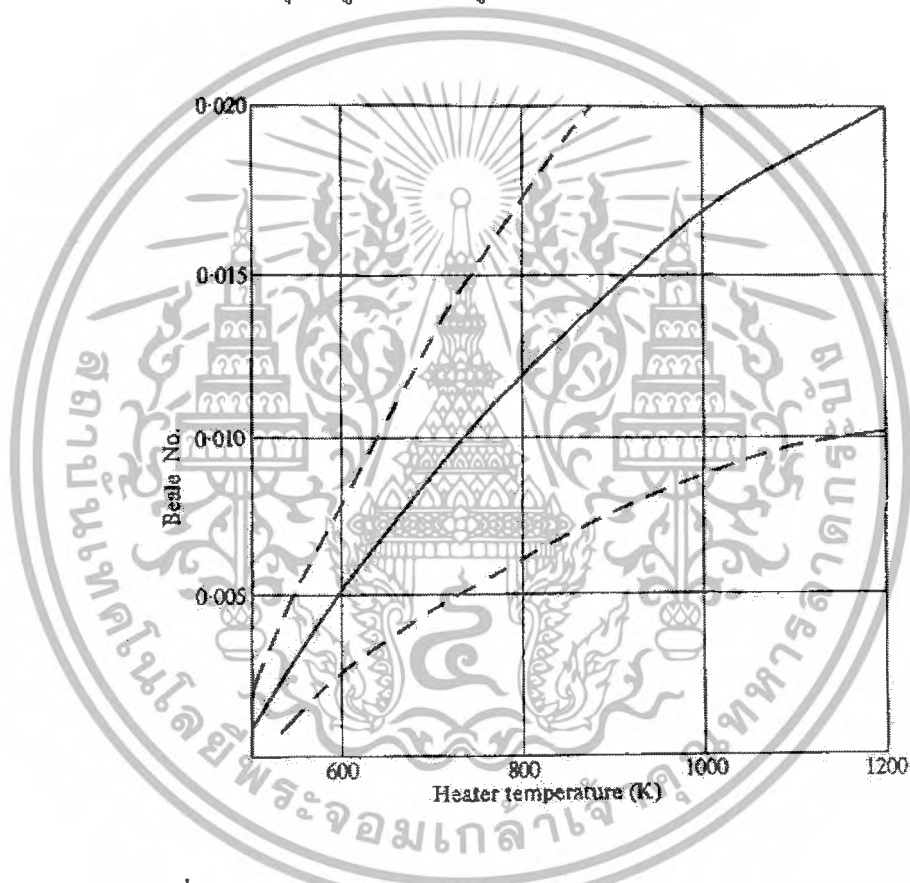
3.9.1 Beale formula

William Beale ได้ทำการสำรวจเป็นเวลาหลายปี ถึงการคำนวณกำลังงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ซึ่งสามารถประมาณค่าได้ตามสมการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{Beale} = 0.015 p_{mean} fV_P \quad (3.12)$$

จัดรูปใหม่ได้ $P/(p_{mean} fV_P) = \text{“ค่าคงที่”}$ เรียกค่าคงที่นี้ว่า “Beale Number” ซึ่งสามารถประมาณค่ากำลังงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ทุกขนาด ทุกประเภท Beale Number เป็นฟังก์ชันของทั้งอุณหภูมิแหล่งความร้อน (source) และอุณหภูมิหล่อเย็น (sink) จากรูป 3.9 แสดงความสัมพันธ์ของ Beale Number และอุณหภูมิแหล่งความร้อน เส้นบนแสดงถึงขอบเขตของการออกแบบที่ดีประสิทธิภาพสูงและอุณหภูมิหล่อเย็นต่ำ ส่วนเส้นล่างคือขอบเขตของการออกแบบที่ดีพอสมควร มีประสิทธิภาพปานกลางและอุณหภูมิหล่อเย็นสูง



รูปที่ 3.9 Beale number เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิแหล่งความร้อน [4]

3.9.2 Mean pressure power formula

ความสัมพันธ์ของ Beale Number ได้ถูกปรับปรุงใหม่โดย Walker, West และ Senft ซึ่งใช้หากำลังที่เพลาคือของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

$$P_{mean} = F p_{mean} fV_P \frac{T_H - T_C}{T_H + T_C} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้มีประโยชน์อย่างมากในขั้นตอนแรกของการออกแบบ Senft พิสูจน์แล้วว่า ค่า F เป็น 2 สำหรับวัฏจักรสเตอร์ลิงอุดมคติ อย่างไรก็ตามในวัฏจักรอุดมคตินั้น ค่า F ไม่ได้พิจารณาการสูญเสียต่าง ๆ หลังจากนั้น Senft และ West จึงทำการคำนวณและพบว่าในการใช้งานจริง สามารถใช้ค่า F ในช่วง 0.25-0.35 ได้

สำหรับการคำนวณที่แม่นยำยิ่งขึ้นกว่า Beale formula ซึ่งถูกใช้ในขั้นตอนการออกแบบนั้น สามารถใช้ Schmidt หรือ West formula ได้เช่นกัน Martini แนะนำว่า กำลังงานจริง (break power output) ที่ได้นั้น สามารถหาได้จากการลดค่าที่คำนวณจาก Schmidt formula โดยใช้ “experience factor” ประมาณ 35%

3.10 การประเมินกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

จากหัวข้อ 3.8 และ 3.9 สามารถประเมินกำลังงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่พัฒนาอย่างคร่าว ๆ ได้ โดยข้อมูลที่ใช้มีดังนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินกำลังงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

อุณหภูมิแหล่งความร้อน	$T_H = 380^\circ\text{C} = 653.15\text{K}$
อุณหภูมิแหล่งเย็น	$T_C = 34^\circ\text{C} = 307.15\text{K}$
อัตราส่วนอุณหภูมิ	$\tau = \frac{323.15\text{K}}{623.15\text{K}} = 0.4703$
ความดันสูงสุดในระบบ	$p_{\max} = 2 \times 101.325\text{kPa} = 202.65\text{kPa}$
ปริมาตรกวาดของคิสเพลสเซอร์	$V_D = 140\text{cm}^3$
ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง	$V_p = 92\text{cm}^3$
ปริมาตรเปล่าประโยชน์ทั้งหมด	$V_s = 28\text{cm}^3$
อัตราส่วนปริมาตรเปล่าประโยชน์	$k_s = 0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินกำลังงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (ต่อ)

อัตราส่วนปริมาตรกวาด	$k_P = \frac{V_P}{V_D} = 0.6571$
มุมที่คิสเพลสเซอร์นำหน้าลูกสูบกำลัง	$\alpha = 102^\circ$
ค่าคงที่ของสมการ (3.13)	$F = 0.3$
ความเร็วรอบของเครื่องยนต์	$f = 10\text{Hz}$

3.10.1 Schmidt formula

จากสมการ (3.7) และ (3.8) จะได้ว่า

$$X = \sqrt{(1 - 0.4703)^2 - 2(1 - 0.4703)(0.6571) + (0.6571)^2}$$

$$X = 0.9259$$

$$Y = 1 + 0.4703 + \left(\frac{4 \times 0.2 \times 0.4703}{1 + 0.4703} \right) + 0.6571$$

$$Y = 2.3834$$

ได้ความดันเฉลี่ยเป็น

$$p_{mean} = 202.65\text{kPa} \times \sqrt{\frac{2.3834 - 0.9252}{2.3834 + 0.9252}}$$

$$p_{mean} = 134.49\text{kPa}$$

งานต่อรอบที่ได้จาก Schmidt formula

$$W_{Schmidt} = \pi(1 - 0.4703)(140 \times 10^{-6} \text{m}^3)(134.49\text{kPa}) \left(\frac{0.6571 \times \sin(102^\circ)}{2.3834 + \sqrt{2.3834^2 - 0.9259^2}} \right)$$

$$W_{Schmidt} = 4.4\text{J/cycle}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ 10 รอบต่อวินาที จะได้กำลังงาน

$$P_{Schmidt} = W_{Schmidt} \times f$$

$$P_{Schmidt} = (4.4J) \times (10 \cdot \text{sec}^{-1})$$

$$P_{Schmidt} = 44W$$

3.10.2 West formula

จากสมการ (3.11) จะได้งานต่อรอบเป็น

$$W_{West} = \left\{ \left(\frac{\pi(134.49kPa)}{2} \right) \times \frac{(140 \times 10^{-6} m^3)(92 \times 10^{-6} m^3)}{(140 \times 10^{-6} m^3) + \left(\frac{92 \times 10^{-6} m^3}{2} \right) + (28 \times 10^{-6} m^3)} \right\} \times \left(\frac{653.15K - 307.15K}{653.15K + 307.15K} \sin(102^\circ) \right)$$

$$W_{West} = 4.48J/cycle$$

เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ 10 รอบต่อวินาที จะได้กำลังงาน

$$P_{West} = W_{West} \times f$$

$$P_{West} = 4.48 \times (10 \cdot \text{sec}^{-1})$$

$$P_{West} = 44.8W$$

3.10.3 Beale formula

จากรูป 3.9 สามารถหา Beale number ได้โดยกำหนดอุณหภูมิแหล่งความร้อนและเส้นกราฟที่จะใช้ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิหล่อเย็นของเครื่องยนต์ ในที่นี้จะใช้อุณหภูมิแหล่งความร้อน 350 °C (623.15K) และใช้เส้นกราฟเส้นกลาง จากกราฟอ่านค่า Beale number ได้ประมาณ 0.005

และเครื่องยนต์ทำงาน 10 รอบต่อวินาที จากสมการ (3.12) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{Beale} = 0.005 p_{mean} f V_P \quad (3.14)$$

$$P_{Beale} = 0.005 \times (134.49 \text{ kPa}) (10 \cdot \text{sec}^{-1}) (92 \times 10^{-6} \text{ m}^3)$$

$$P_{Beale} = 0.6186 \text{ W}$$

3.10.4 Mean pressure formula

จากสมการ (3.13) จะเห็นว่า ค่าคงที่ F ที่แนะนำให้ใช้อยู่ในช่วง 0.25-0.35 ในที่นี้เลือกใช้ค่า $F = 0.3$ ในการคำนวณ

$$P_{mean} = 0.3 \times (134.49 \text{ kPa}) (10 \cdot \text{sec}^{-1}) (92 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \left(\frac{653.15 \text{ K} - 307.15 \text{ K}}{653.15 \text{ K} + 307.15 \text{ K}} \right)$$

$$P_{mean} = 13.37 \text{ W}$$

3.10.5 กำลังงานจากการลดค่าจาก Schmidt formula

กำลังงานที่ลดค่าจาก Schmidt formula อยู่ที่ประมาณ 35% ดังนั้นจะได้ว่า

$$P_{reduce} = (1 - 0.35) \times P_{Schmidt} \quad (3.15)$$

$$= 0.65 \times (44 \text{ W})$$

$$P_{reduce} = 28.6 \text{ W}$$

จากการคำนวณข้างต้นเป็นการประเมินกำลังงานของเครื่องยนต์โดยไม่ได้พิจารณาการสูญเสียความร้อนและแรงเสียดทาน

บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 ขั้นตอนการทำงาน

4.1.1 กระทบกสูบคิสเพลสเซอร์

เพื่อให้กระทบกสูบคิสเพลสเซอร์มีความแข็งแรง จึงได้เลือกใช้เพลลาเหล็กตัน แทนการใช้ท่อเหล็กกลวงเนื่องจากต้องทำการเชื่อมปิดหัว ซึ่งอาจเกิดรอยร้าวได้

ขั้นตอนการทำงาน

- 1). ใช้เพลลาเหล็กตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ดังรูป 4.1 ตัดให้มีความหนาประมาณ 40 มม.
- 2). การทำกระทบกสูบแบบไม่มีครีป ทำการกลึงคว้านให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 85 มม. ลึกประมาณ 25 มม. ทำสองชิ้นจะได้ดังรูป 4.3 (ก)
- 3). ทำครีปภายใน โดยใช้ดอกสว่านขนาด 3.5 มม.เจาะที่เส้นรอบวงภายในที่ 85 มม. ลึก 25 มม. จากนั้นจึงทำการคว้านโดยใช้รอบต่ำที่สุดเพื่อป้องกันมีดกลึงหัก และคว้านเพื่อทำครีปที่ส่วนหัวของกระทบกสูบ ทำสองชิ้น จะได้ดังรูป 4.3 (ข)
- 4). ติดตั้งตัวยึดที่ชิ้นงานทั้งสองแบบ ซึ่งทำมาจากเหล็กแผ่นหนา 5 มม. เจาะรูขนาด 6 มม. สำหรับน็อตยึดแล้วทำการเชื่อมแต่ละชิ้นทำมุมกัน 120 องศา ดังรูป 4.3 และ 4.4
- 5). ทำปลอกสำหรับก้านสูบคิสเพลสเซอร์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเป็น 5 มม. และ 18 มม. ตามลำดับ ยาว 60 มม. แล้วเชื่อมต่อเข้ากับส่วนยื่นของกระทบกสูบคิสเพลสเซอร์ ดังรูป 4.5
- 6). เชื่อมกระทบกสูบคิสเพลสเซอร์ส่วนยื่นกับฐาน ซึ่งเป็นตัวยึดกระทบกสูบคิสเพลสเซอร์เข้ากับเครื่องยนต์ และเป็นฝาของกระทบกสูบกำลัง ทำการเชื่อมท่อจากส่วนยื่นต่อกับกระทบกสูบกำลัง ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 17 มม. ดังรูป 4.5
- 7). เจาะรูที่ส่วนยื่นของกระทบกสูบคิสเพลสเซอร์ สำหรับการติดตั้งวาล์วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มม. ดังรูป 4.5

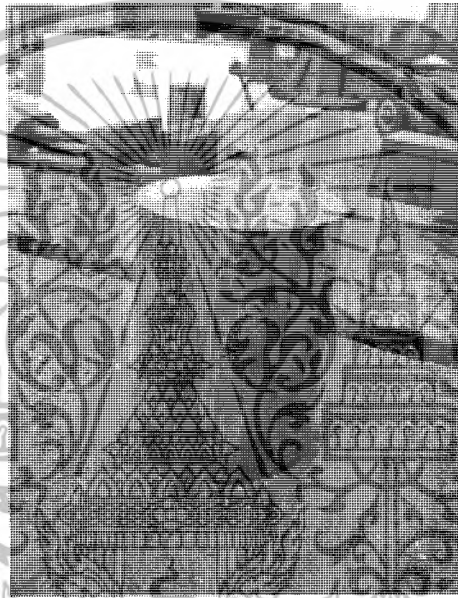
4.1.2 การทำฉนวนกันความร้อน

ฉนวนกันความร้อนใช้กันความร้อนจากส่วนรับความร้อนไปยังส่วนคายความร้อน ทำจากปูนผสมทรายละเอียด

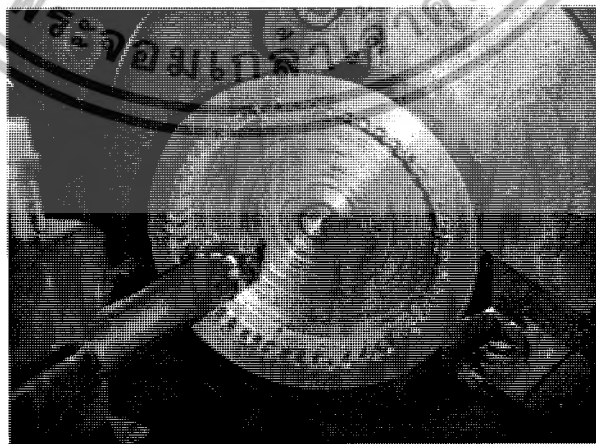
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทำ

- 1). ทำโครงลวดเสริมความแข็งแรง เพื่อป้องกันการแตกหักของชิ้นงาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มม. ยาว 25 มม. ทำให้มีลักษณะเป็นตาข่าย ดังรูป 4.6
- 2). ทำแม่พิมพ์หล่อปูนจากดินน้ำมันให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอก 85 มม. และ 95 มม. ตามลำดับ
- 3). ผสมปูนซีเมนต์ ทรายหยาบ และน้ำ ในอัตราส่วน 1:2.5:1 แล้วเทลงในแม่พิมพ์ที่ใส่โครงลวดไว้ รอจนปูนแห้ง จึงแกะปูนออกจากแม่พิมพ์

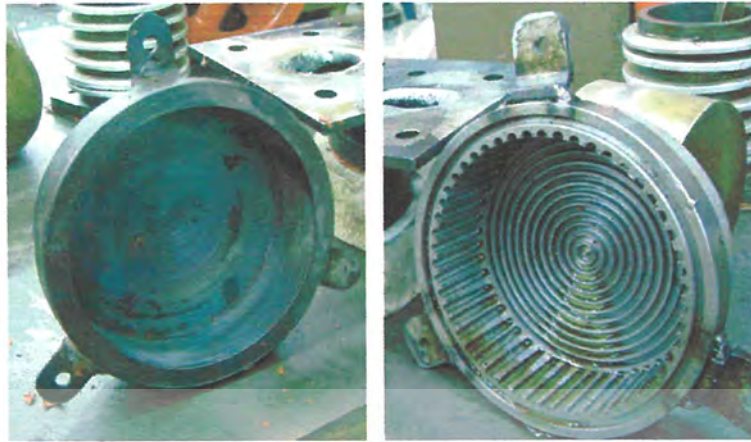


รูปที่ 4.1 เพลตั้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม.



รูปที่ 4.2 การกลึงคว้านกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์แบบมีครีป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 ครอบกดสุบดิสเพลสเซอร์

(ก) แบบไม่มีครีป

(ข) แบบมีครีป



รูปที่ 4.4 ตัวยึดเนื้อที่ครอบกดสุบดิสเพลสเซอร์

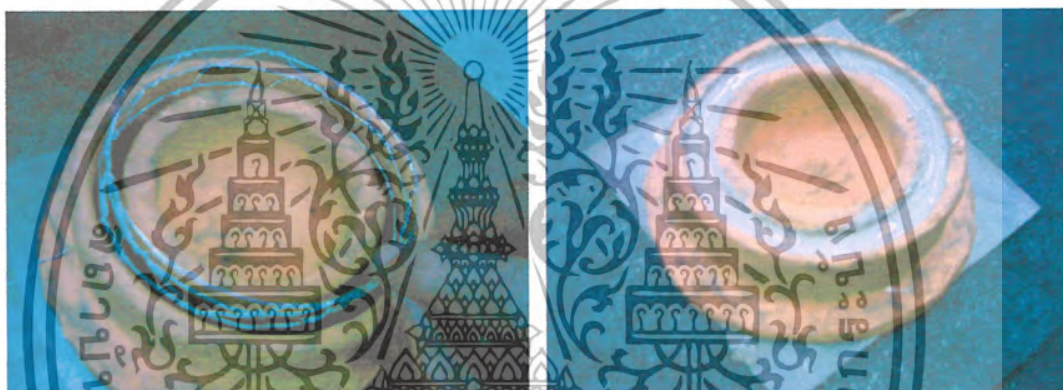


รูปที่ 4.5 ครอบกดสุบดิสเพลสเซอร์ที่ประกอบแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 โครงทวดเสริมความแข็งแรงสำหรับฉนวนซีเมนต์



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.7 การหล่อปูนซีเมนต์ในแม่พิมพ์ดินน้ำมัน

(ก) การใส่โครงทวด

(ข) ปูนซีเมนต์ในแม่พิมพ์ดินน้ำมัน



รูปที่ 4.8 ฉนวนปูนซีเมนต์ที่ทำเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ดิสเพลสเซอร์ (displacer)

ดิสเพลสเซอร์หรือตัวแทนที่อากาศ จากรูป 3.3 จะเห็นได้ว่า ดิสเพลสเซอร์จะไม่สัมผัสกับผนังกระบอกสูบ ดังนั้น ดิสเพลสเซอร์จึงควรมีน้ำหนักเบาเพื่อป้องกันก้านสูบดิสเพลสเซอร์งอ จากการทำให้ดิสเพลสเซอร์เองนั้น สามารถใช้งานได้เพียงระยะหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากรอยบัดกรีละลาย จึงว่าจ้างทำชิ้นงานแทน โดยใช้วัสดุเป็นสเตนเลส สตีล ดังรูป 3.2

4.1.4 ขดลวดความร้อน (resistance wire)

ขดลวดความร้อนนี้เป็นชิ้นงานที่สั่งทำมีกำลังงานสูงสุด 600 วัตต์ ใช้แรงดัน 220 โวลต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่น 120 มม. วิธีการใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือ ติดไว้ที่ส่วนรับความร้อน



รูปที่ 4.9 ขดลวดความร้อน

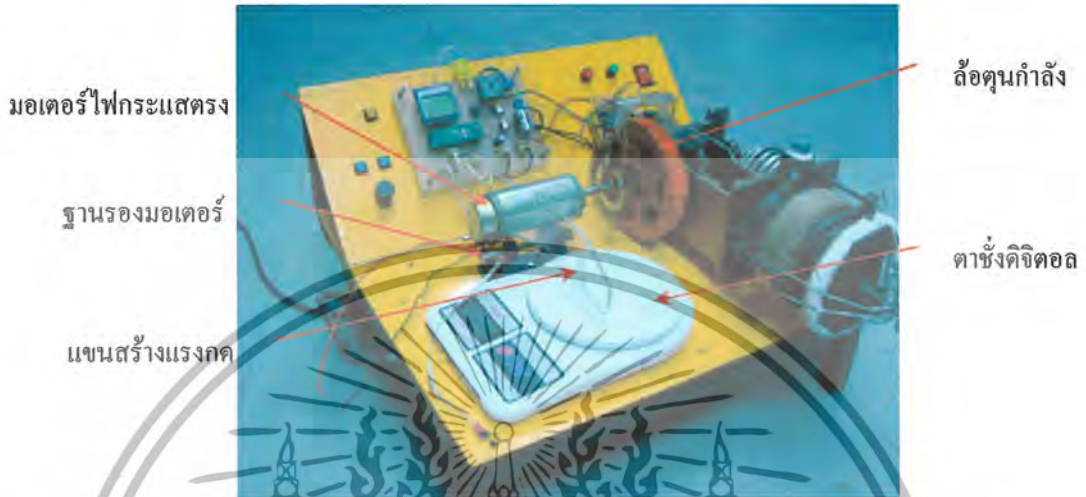
4.1.5 อุปกรณ์วัดแรงบิด

เป็นอุปกรณ์ที่ทำขึ้นเอง ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้

- 1). มอเตอร์ไฟกระแสตรง ใช้เป็นเจนเนอเรเตอร์ติดตั้งที่ล้อศูนย์กลางดังรูป 4.10 เพื่อสร้างกระแสไฟฟ้า แล้วต่อกระแสไฟที่ได้เข้ากับตัวต้านทานเพื่อสร้างแรงต้านทานการหมุนของเครื่องยนต์
- 2). ฐานวางมอเตอร์ มีลักษณะเป็นลูกถ้วยเพื่อให้มอเตอร์สามารถหมุนได้รอบตัวเองได้
- 3). แขนสร้างแรงกด ซึ่งทำจากแผ่นอะคริลิกความยาวแขนจากจุดกดถึงศูนย์กลางมอเตอร์เป็น 0.1 เมตร
- 4). ตาชั่งแบบดิจิตอล พิกัด 5 กิโลกรัม วัดความละเอียดได้ 1 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 4.10 แรงกดจากแขนที่ต่อกับมอเตอร์กับมอเตอร์คมนาซังดิจิตอล เกิดจากแรงบิดด้านการหมุนของมอเตอร์เมื่อต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากตัวต้านทานที่มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 1,000 โอห์ม ดังรูป 3.8



รูปที่ 4.10 อุปกรณ์วัดแรงบิดและการติดตั้ง

4.1.6 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ

จากรูป 3.5 (ก) จะเห็นว่าส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์วัดความเร็วรอบมีดังนี้

1). แผ่นโรตารี เป็นแผ่นที่มีช่องว่างเล็ก ๆ สลับกัน เพื่อให้ลำแสงอินฟราเรดผ่านได้ วิธีการทำนี้คือ ลอกแถบข้อมูลบนแผ่นซีดีออกให้หมด จากนั้นนำแถบรีวช่องว่างถ่ายเอกสารบนแผ่นใส แล้วนำแผ่นใสนั้นติดลงบนแผ่นซีดีที่เตรียมไว้ จะได้ดังรูป 4.11 (ก) จากนั้นนำแผ่นโรตารีที่ทำเสร็จแล้ว ติดตั้งที่ล้อศูนย์กลาง ดังรูป 4.12

2). หัวอ่านลำแสงอินฟราเรด ประกอบไปด้วย ตัวส่งและตัวรับแสงอินฟราเรด ดังรูป 4.11 (ข)

3). ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลความเร็วรอบ ทำหน้าที่ตามคำสั่งที่เขียนควบคุมด้วยภาษาซี (C-Language) มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

3.1). อ่านสัญญาณจากหัวอ่านอินฟราเรด เมื่อแผ่นโรตารีหมุน สัญญาณแสงที่ตัวรับจะเป็นลูกคลื่น ดังรูป 4.13 ซึ่งเป็นสัญญาณอนาลอก จากนั้นทำการขยายสัญญาณจาก 0.811 โวลต์ ด้วยออปแอมป์กำลังขยาย 5.33 เท่า ได้สัญญาณอนาลอกขนาด 4.81 โวลต์ ดังรูป 4.14

3.2). แปลงสัญญาณจากสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลด้วย threshold comparator จะได้สัญญาณพัลส์ออกมา กำหนดแรงดันไฟอ้างอิงที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์ จากค่าอ้างอิง พัลส์ที่ได้จะมีค่าเป็น “หนึ่ง” เมื่อแรงดันไฟมากกว่า 2.5 โวลต์ และเป็น “ศูนย์” เมื่อแรงดันไฟน้อยกว่า 2.5 โวลต์ ดังรูป 4.15

3.3). ในการแปลงสัญญาณนั้น สัญญาณที่ได้ยังไม่เสถียร ดังรูป 4.16 หากไม่แก้ไขค่าที่อ่านได้จะผิดพลาด แก้ไขได้โดยใช้ monostable multivibrator ชนิดทรานซิสเตอร์ เมื่อสัญญาณที่เข้าวงจร monostable multivibrator เป็นสัญญาณที่มีช่วงพัลส์ไม่คงที่ สัญญาณที่ออกมาจะเป็นสัญญาณที่มีพัลส์คงที่ และสัญญาณพัลส์ที่คงที่นี้ ดังรูป 4.17 และ 4.18 จะถูกนำไปคำนวณความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (รูป 3.5 (ข)) ตามสมการ (18)



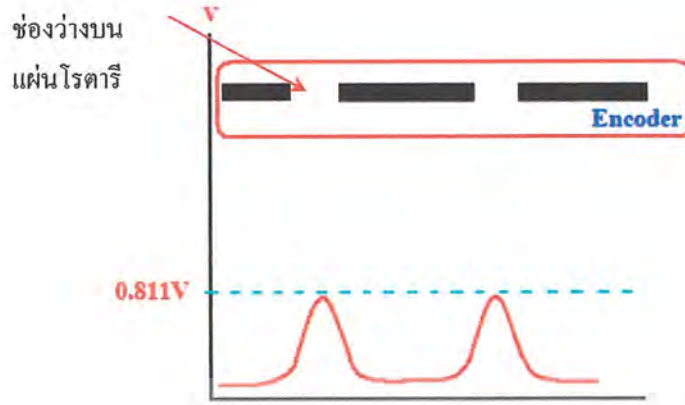
รูปที่ 4.11 ชุดอุปกรณ์วัดรอบที่ทำขึ้นเอง

(ก) แผ่นโรตารีที่ทำเอง

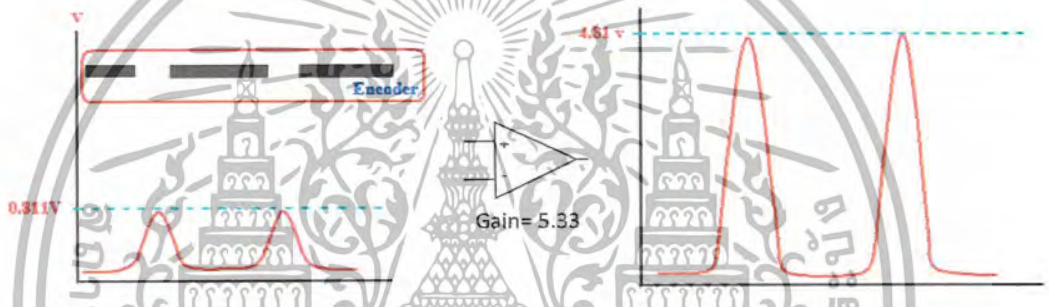
(ข) หัวอ่านลำแสงอินฟราเรด

รูปที่ 4.12 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ

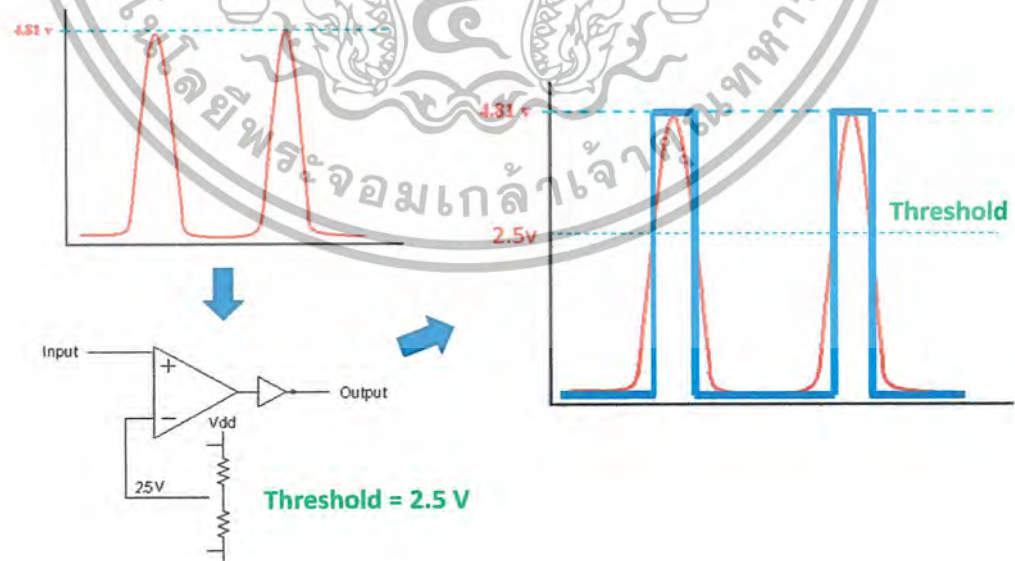
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 สัญญาณที่ได้จากแผ่น โรตารีหมุนผ่านลำแสงอินฟราเรด

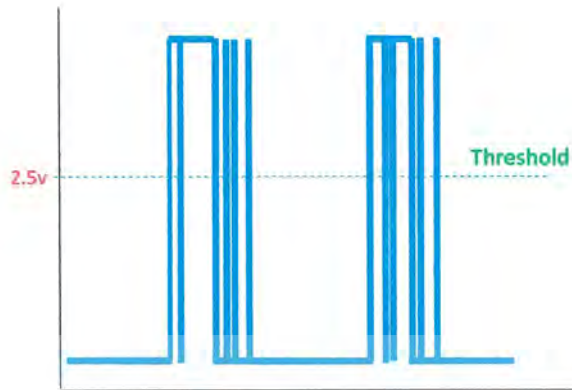


รูปที่ 4.14 สัญญาณอนาล็อกที่ถูกขยายด้วยกำลัง 5.33 เท่า ด้วยออปแอม

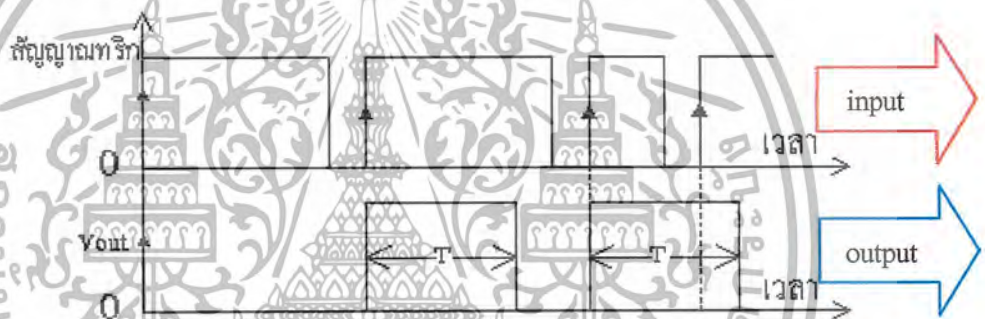


รูปที่ 4.15 สัญญาณอนาล็อกที่ถูกแปลงด้วย threshold comparator ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล

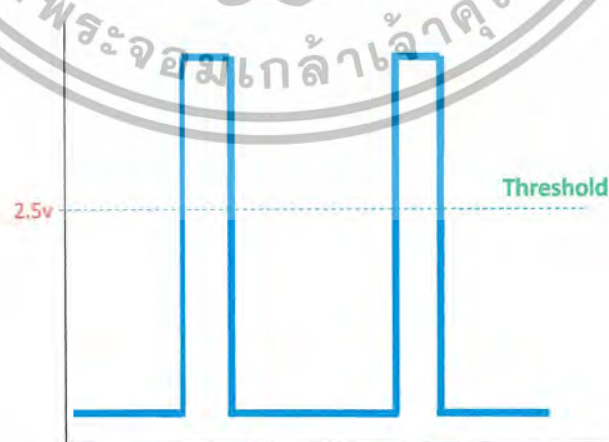
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 สัญญาณดิจิทัลที่ไม่เสถียรที่ได้จาก threshold comparator

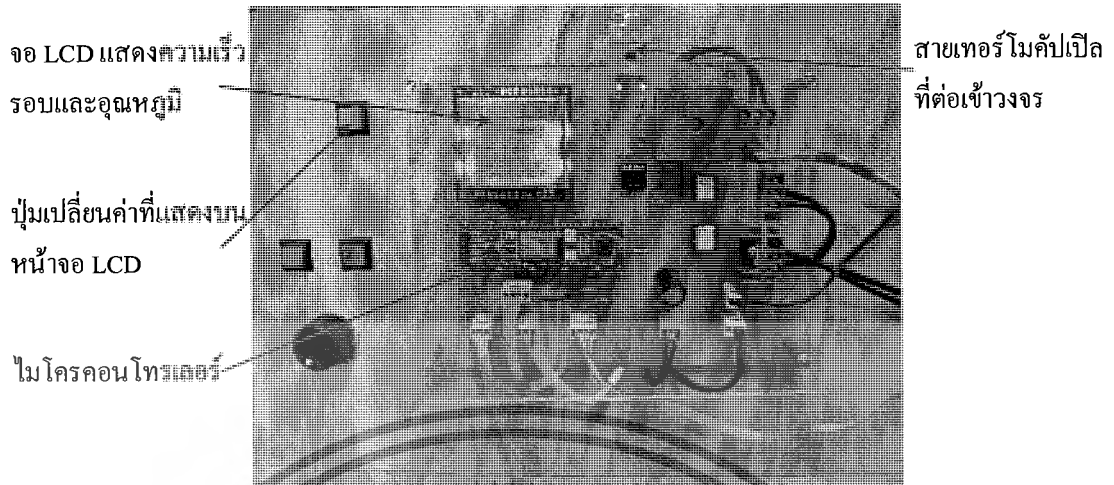


รูปที่ 4.17 สัญญาณที่เข้าและออกจากวงจร monostable multivibrator ชนิดทริกซ์ไม่ได้



รูปที่ 4.18 สัญญาณที่เสถียรได้จากวงจร monostable multivibrator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

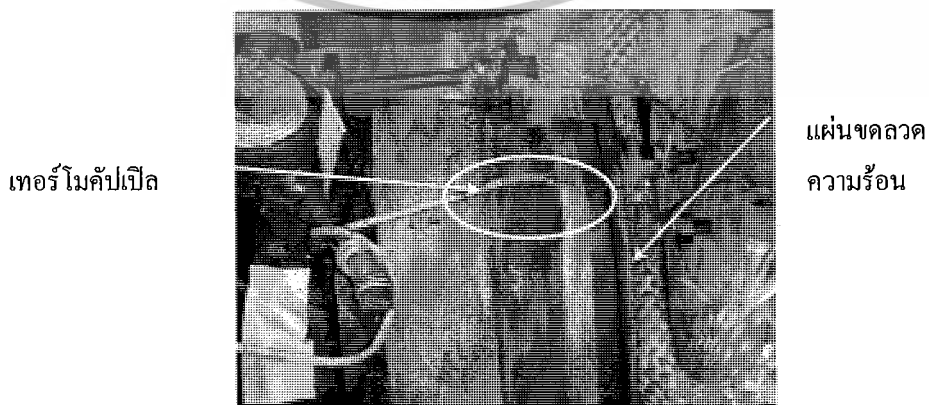


รูปที่ 4.19 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลความเร็วรอบและอุณหภูมิแหล่งความร้อน

4.1.7 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (thermometer)

เทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้เป็นแบบเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วจึงไม่ทราบชนิดและความเที่ยงตรง รวมถึงค่าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลเป็นสัญญาณอนาล็อก จึงต้องทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิ ขั้นตอนการเปรียบเทียบค่ามีดังนี้

- 1). ขยายสัญญาณอนาล็อกโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งใช้วงจรขยายสัญญาณ ดังรูป 3.6
- 2). ค่าที่ได้จากการขยายสัญญาณต้องนำไปเทียบกับอุณหภูมิที่ทราบค่า เพื่อแปลความหมาย ดังรูป 3.7 และทำการปรับค่าได้จุดวงกลมบนกราฟ ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ตามสมการ (19) และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่าที่ได้จากการขยายสัญญาณตามสมการ (19) ให้เป็นอุณหภูมิทางกายภาพ (องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิธีการทดสอบเครื่องยนต์

- 1). ทำการประกอบคิสเพลสเซอร์เข้าในกระบอกสูบแบบไม่มีครีบบนในให้แน่น จากนั้นนำขดลวดความร้อนกำลัง 600 วัตต์ แรงดัน 220 โวลต์ ติดตั้งที่ส่วนหัวของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์และใช้ฉนวนใยเซรามิกปิดที่หลังขดลวดความร้อนเพื่อลดการสูญเสียความร้อน
- 2). ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่กระบอกสูบส่วนร้อน และส่วนเย็น
- 3). ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ วัดแรงบิด
- 4). เสียบปลั๊กกับแหล่งไฟฟ้า 220 โวลต์ เปิดสวิตช์หลัก (การใช้งานอุปกรณ์อยู่ในภาคผนวก ข.) ตั้งกำลังงานของขดลวดความร้อนให้มากกว่า 400 วัตต์ เพื่อให้เครื่องยนต์เริ่มทำงานรอบประมาณ 5 นาที เครื่องทำงานจะเริ่มทำงาน
- 5). รอจนเครื่องทำงานจนมีความเร็วรอบคงที่ ทำการวัดแรงบิด โดยใช้เจนเนอเรเตอร์ต่อตัวต้านทานปรับค่าได้ และอ่านค่าแรงที่เจนเนอเรเตอร์ตกลงบนตาชั่ง และทำการเพิ่ม ภาระงานขึ้นไปเรื่อย ๆ บันทึกค่าแรงบิดที่รอบนั้น ๆ พร้อมกับบันทึกอุณหภูมิ
- 6). เปลี่ยนชุดคิสเพลสเซอร์เป็นแบบมีครีบบ ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 4
- 7). วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลองของเครื่องยนต์ที่ใช้กระบอกสูบคิสเพลสเซอร์แบบไม่มีครีบบและแบบมีครีบบ เปรียบเทียบกับผลจากเครื่องยนต์ก่อนและหลังการพัฒนาที่กระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ทั้งสองแบบ เปรียบเทียบผลของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์แบบมีครีบบและไม่มีครีบบ รวมถึงผลของการติดตั้งวาล์ว



รูปที่ 4.21 ชุดทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

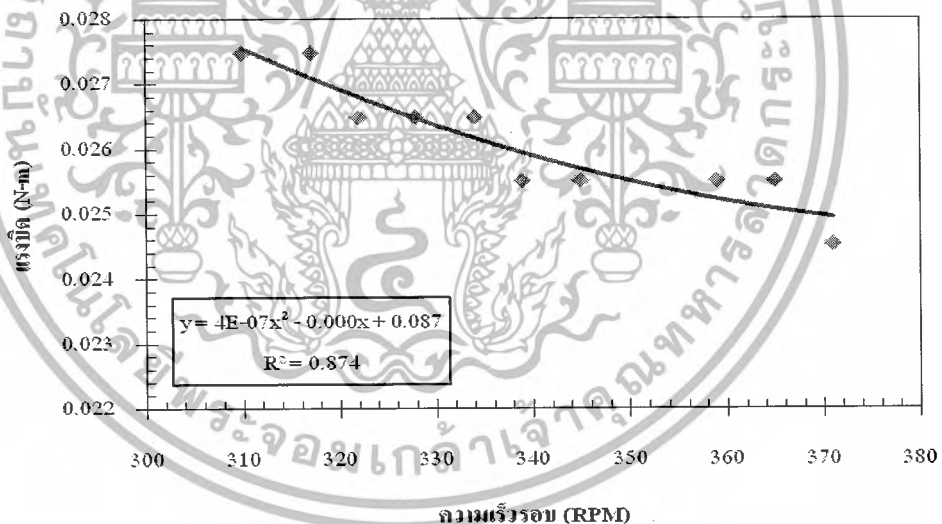
บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

การทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าพลังงานหลังการพัฒนาเครื่องยนต์ทั้งเครื่องยนต์ที่ใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีคิริบและมีคิริบ โดยควบคุมกำลังงานที่ให้ไว้ที่ประมาณ 600 วัตต์ ซึ่งมีอุณหภูมิที่ส่วนร้อนเฉลี่ยประมาณ 380 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิหล่อเย็นประมาณ 33 องศาเซลเซียส ให้ภาระงานโดยต่อเจเนเนอรรเตอร์กับตัวต้านทานปรับค่าได้ ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่พัฒนามีดังนี้

5.2 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีคิริบภายใน

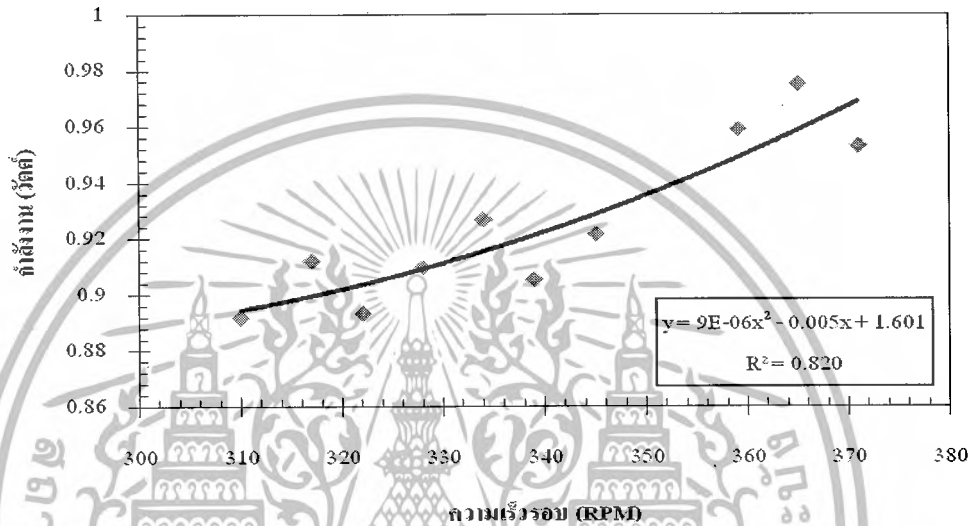


รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีคิริบ

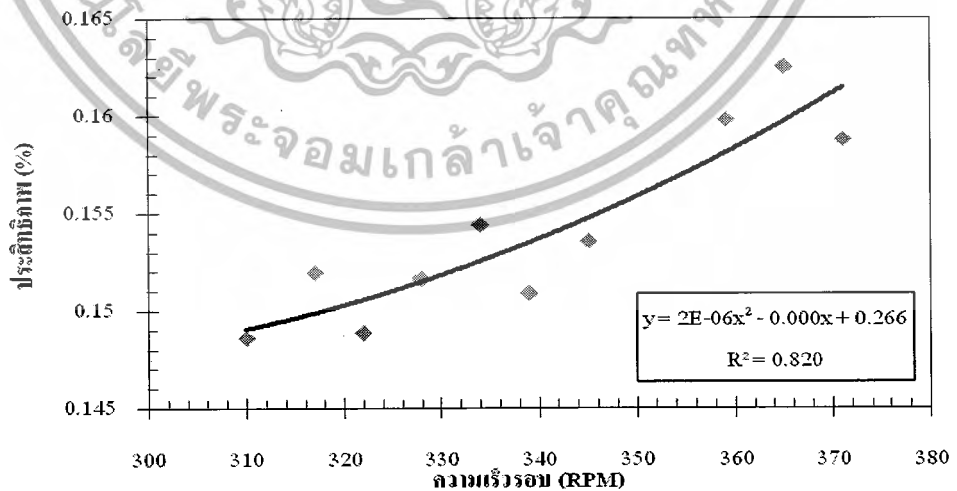
การทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง มีการให้กำลังงานที่คงที่ การเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ จะทำให้เครื่องยนต์ทำงานช้าลงจนกระทั่งทำให้เครื่องยนต์หยุดทำงาน ซึ่งกล่าวได้ว่าเมื่อแรงบิดลดลง ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.1 พบว่าแรงบิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแคบ ๆ สาเหตุมาจากปัญหาการรั่วซึมของสารทำงานในระบบที่ถูกสูบกำลัง เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่รอบต่ำหรือแรงบิดสูง จะทำให้อากาศในระบบรั่วออก จนกระทั่งเมื่อลดแรงบิดลงทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้รอบสูงขึ้นการรั่วซึมของอากาศจึงลดลง รวมถึงกระบอกสูบชนิดไม่มีคิรียภายในมีพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อย กำลังงานที่ได้จึงค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีคิรีย



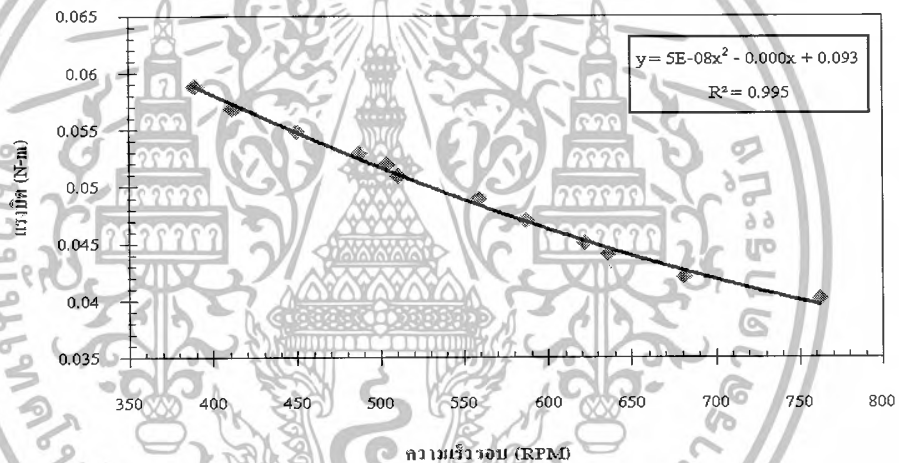
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีคิรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.2 พบว่ากราฟมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการที่มีภาระงานมากทำให้เกิดการรั่วซึมของแก๊สได้มาก แต่กราฟก็ยังไม่ถึงจุดสูงสุด เนื่องจากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนยังไม่สูงพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังงานของขดลวดความร้อนและการใช้งานที่ต้องป้องกันความเสียหายของขดลวดความร้อนจากความร้อนที่สูงเกินไป ประกอบกับชุดดิสเพลสเซอร์ที่ทดลองเป็นชนิดไม่มีครีบบนทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่ดีพอ

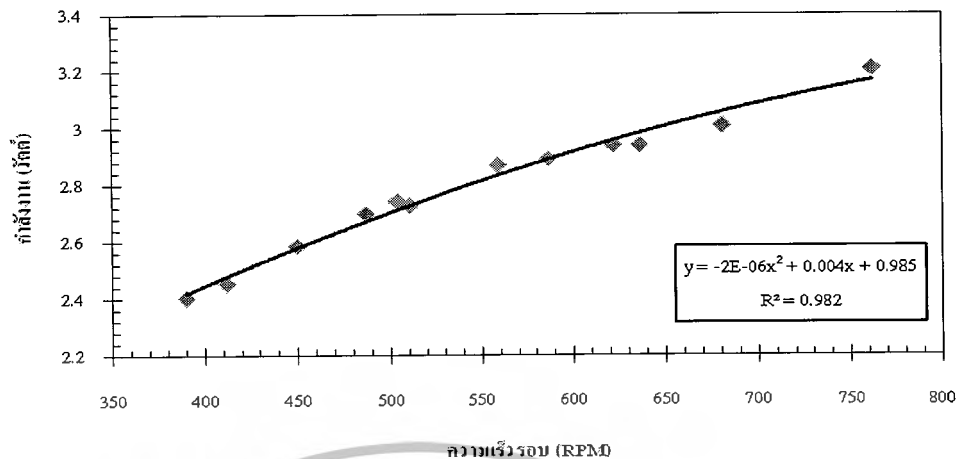
เมื่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์หาได้จากกำลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์หารด้วยกำลังงานที่คงที่ที่ให้กับเครื่องยนต์ ดังนั้น ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องยนต์จึงมีแนวโน้มเดียวกันกับกราฟของกำลังงาน ดังรูป 5.3

5.3 ผลการทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบบน

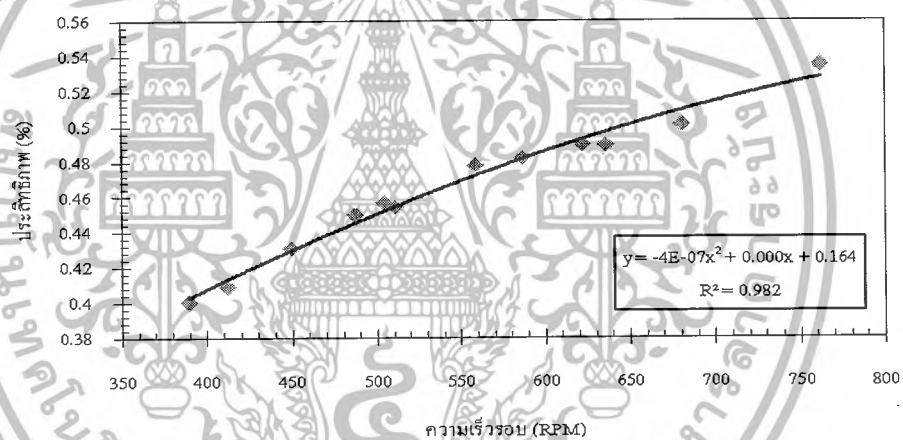


รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบบน

จากรูป 5.4 เป็นผลจากการทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์ ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับกล่าวในหัวข้อ 5.1 ผลของการทำครีบบนในกระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น ส่งผลให้เครื่องยนต์มีแรงบิดเพิ่มขึ้นและมีรอบการทำงานที่สูงขึ้นเช่นกัน จากรูป 5.5 เห็นได้ว่ากำลังงานของเครื่องยนต์ ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ สัมพันธ์กับความเร็วรอบ แต่ยังไม่ถึงจุดสูงสุด เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีครีบบน การเพิ่มกำลังงานให้กับเครื่องยนต์จะทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานจนถึงจุดสูงสุดได้ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ดังรูป 5.6 มีแนวโน้มตามกราฟของกำลังงานดังที่กล่าวในหัวข้อ 5.2



รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอบกวนดิสเพลสเซอร์ชนิดมีคิริบ



รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอบกวนดิสเพลสเซอร์ชนิดมีคิริบ

5.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์

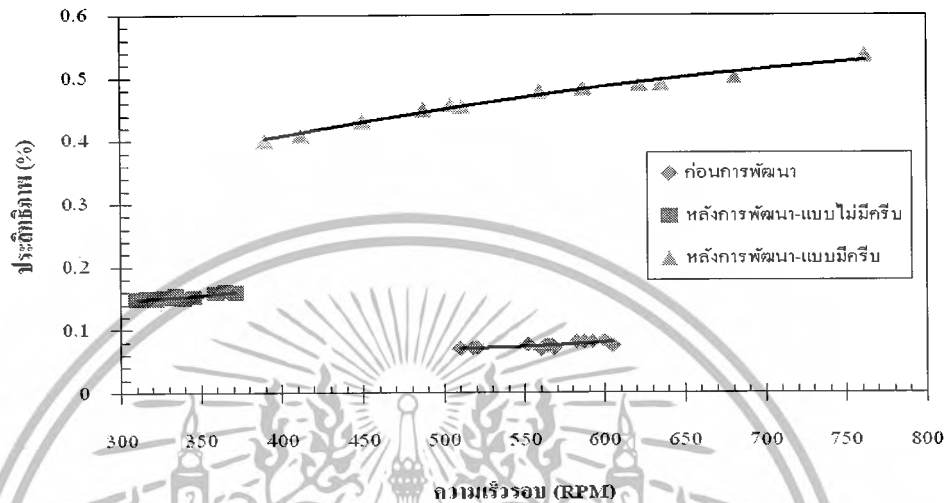
5.3.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องยนต์ก่อนและหลังการพัฒนา

จากรูป 5.7 ข้อมูลที่นำมาจากโครงการเดิม [3] เป็นการทดสอบผลของอัตราส่วนปริมาตรเปล่าประโยชน์ต่อกำลังงานของเครื่องยนต์ เห็นได้ว่ามีค่าต่ำกว่า 0.1 % แม้ว่าแหล่งความร้อนที่ใช้เป็นขดลวดความร้อนที่ใช้กระแสไฟ 10 แอมป์ แรงดัน 220 โวลต์ ติดตั้งอยู่ภายในกระบอบกวนมีการถ่ายเทความร้อนได้โดยตรง แต่จากการออกแบบดิสเพลสเซอร์ที่ไม่เหมาะสม นั่นคือ ปริมาตร

กวาดของดิสเพลสเซอร์มีค่าใกล้เคียงกับลูกสูบกำลัง เมื่อมวลอากาศที่ส่วนขยายตัวมีน้อย การ

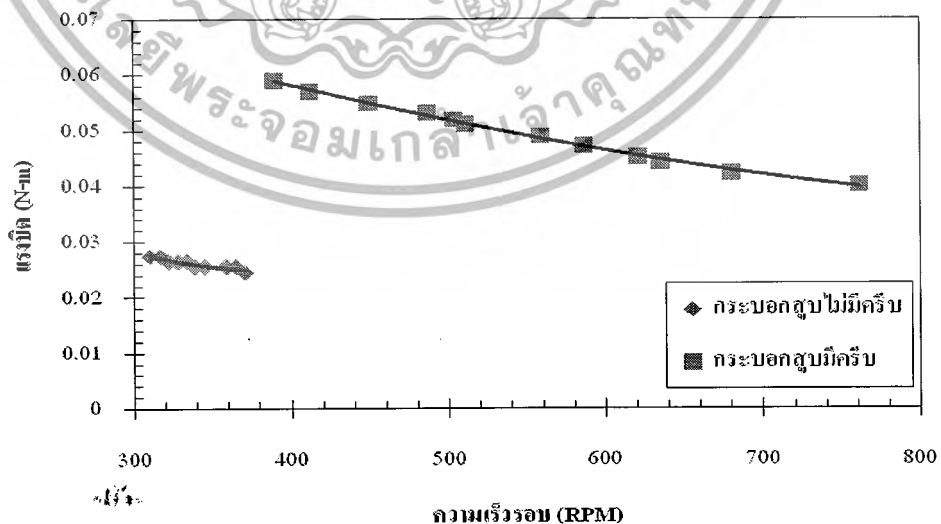
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายตัวของแก๊สจึงต้องใช้พลังงานความร้อนมาก เพื่อให้มีแรงดันเพียงพอที่จะดันลูกสูบกำลังให้ เกิดงานออกมาที่เพลาคือเหวี่ยง เมื่อเทียบจากกำลังงานที่ให้กับเครื่องยนต์ที่สูงมาก ทำให้ได้ ประสิทธิภาพที่ต่ำมาก



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก่อนและหลังการพัฒนา

5.3.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะที่ได้จากการใช้กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีครีบริบและมีครีบริบภายใน

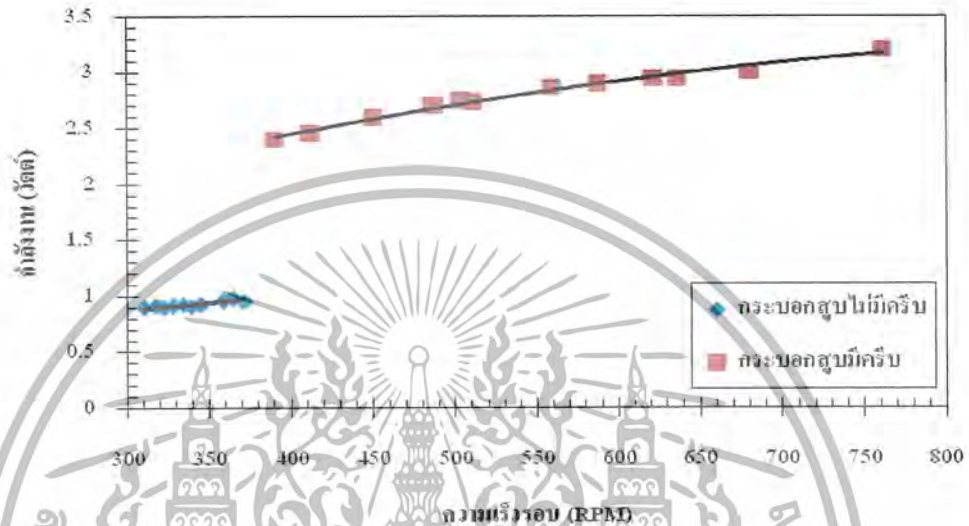


รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์

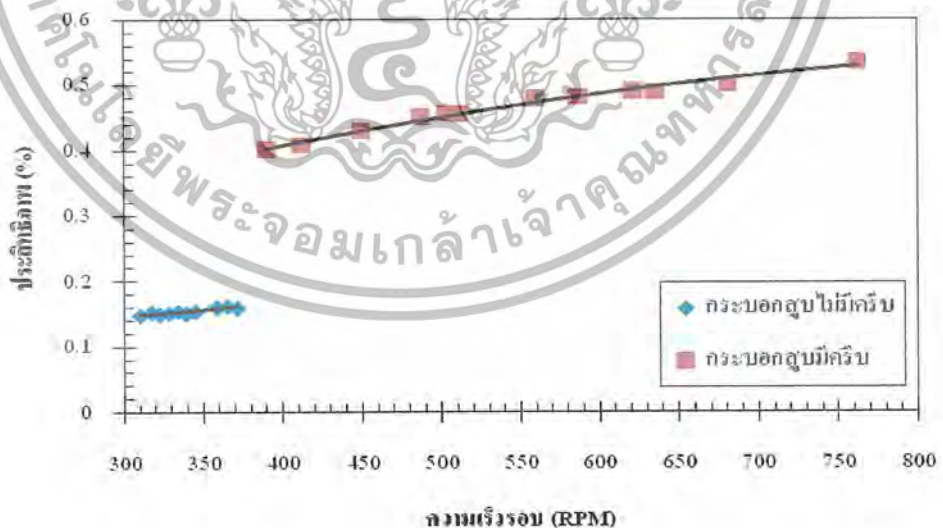
ชนิดมีครีบริบและไม่มีครีบริบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.8-10 เห็นได้ว่ากระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบบีสมรรถนะสูงกว่าชนิดไม่มีครีบ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนภายในมากขึ้น กำลังงานที่ได้จึงเพิ่มขึ้น แม้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้กระบอกสูบชนิดมีครีบจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ก็ถือว่ามีความต่ำมาก



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานของเครื่องยนต์ดีเซลเครื่องที่ใช้กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบและไม่มีครีบ



รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดีเซลเครื่องที่ใช้กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบและไม่มีครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ติดตั้งวาล์ว

จากสมมติฐานที่ตั้งขึ้นว่า การระบายความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้อากาศเป็นสารทำงานน่าจะใช้การระบายอากาศร้อนออกจากระบบในจังหวะการขยายตัวของสารทำงาน และดูดอากาศเย็นเข้ามาแทนในจังหวะการอัดตัว คล้ายกับหลักการ การดูดและคายไอเสียในเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบ จึงได้นำสมมติฐานนี้ทำการทดลองติดตั้งวาล์วเปิด-ปิด ซึ่งควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานร่วมกับระบบการวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และสามารถระบุตำแหน่งมุมการหมุนของลูกสูบได้เพื่อใช้เปิด-ปิดวาล์ว ในจังหวะการขยายและอัดตัวตามลำดับ

ผลจากการใช้วาล์วเปิด-ปิด พบว่า ในจังหวะการอัดตัวซึ่งเป็นการดูดอากาศเย็นเข้าสู่ระบบเมื่อลูกสูบกำลังเริ่มเคลื่อนที่ไปยังจุดศูนย์ตายบน อากาศเย็นที่มีความหนาแน่นสูงได้รั่วออกที่ระยะเพื่อของผนังกระบอกสูบและลูกสูบกำลัง จึงเป็นการสูญเสียกำลังงาน โดยเปล่าประโยชน์และไม่มีกำลังพอที่จะทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้ครบวัฏจักร เครื่องยนต์จึงหยุดทำงาน



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 ผลจากการใช้กระบอบลูกสูบคิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีคิริบภายใน

จากรูป 5.1-3 เมื่อพิจารณาจุดข้อมูลบนกราฟ เครื่องยนต์ให้กำลังงานในช่วงที่แคบ คือระหว่าง 0.8-1.0 วัตต์ มีรอบการทำงานในช่วง 310-371 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นช่วงที่แคบ และกำลังงานที่ได้ยังไม่ถึงจุดสูงสุด ซึ่งเกี่ยวข้องกับผิวภายในของกระบอบลูกสูบเป็นผิวเรียบทำให้การถ่ายเทความร้อนจากผิวภายในสู่แก๊สในระบบ ได้จำกัด ดังนั้น กำลังงานที่ให้กับเครื่องยนต์ยังไม่สูงพอที่จะทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้เต็มที่ การที่จะเพิ่มกำลังงานของเครื่องยนต์จึงต้องให้พลังงานความร้อนที่มากขึ้น

กำลังงานที่ได้จากการใช้กระบอบลูกสูบคิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีคิริบเฉลี่ย 0.93 วัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพ 0.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก จากวัฏศาสตร์ถึงในอุดมคติ รูป 2.3 ในกระบวนการ 4-1 มีการถ่ายเทความร้อนจากสารทำงานให้รีเจนเนอเรเตอร์ก่อนที่สารทำงานจะคายความร้อนออกนอกระบบ และกระบวนการ 2-3 มีการถ่ายเทความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ให้สารทำงานก่อนที่จะรับความร้อนจากภายนอก ซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทกลับไปกลับมาเป็นการลดการสูญเสียความร้อนและการรับความร้อนจากภายนอก รวมถึงเป็นการเพิ่มงานของระบบ เมื่ออัตราการรับ (3-4) และคายความร้อน (1-2) ของระบบคงที่ ดังนั้น เหตุผลที่ทำให้เครื่องยนต์ที่พัฒนามีประสิทธิภาพต่ำ มาจากการที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ สารทำงานที่ร้อนจึงคายความร้อนออกนอกระบบโดยตรงและต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการรับและคายความร้อน ซึ่งเป็นการจำกัดกำลังงานและรอบการทำงานของเครื่องยนต์เช่นกัน

ปัญหาการรั่วซึมของแก๊สในระบบทำให้เครื่องยนต์รับภาระงานสูงไม่ได้ การทำงานที่รอบต่ำจะทำให้แก๊สในระบบรั่วออกได้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้แก๊สรั่วออกในจังหวะขยายตัวและต้องดูดอากาศภายนอกเข้ามาแทนที่อีกครั้งในจังหวะอัดตัว จึงเป็นการสูญเสียกำลังงานโดยเปล่าประโยชน์

แม้ว่าเครื่องยนต์ที่ใช้กระบอบลูกสูบชนิดไม่มีคิริบจะทำงานได้ในช่วงแคบ แต่ก็ไม่สามารถทำงานที่รอบต่ำกว่า 300 รอบต่อนาที ได้เนื่องจากผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนและการรั่วซึมทำให้เครื่องยนต์เริ่มทำงานเมื่อมีอุณหภูมิที่สูงพอสมควรประมาณ 300 องศาเซลเซียส ขึ้นไป หากต้องการลดอุณหภูมิที่เครื่องยนต์เริ่มทำงาน ต้องออกแบบให้ปริมาตรกวาดของคิสเพลสเซอร์ใหญ่มากเมื่อเทียบกับปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.2 ผลจากการใช้กระบอบอบชุบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบภายใน

เมื่อขนาดกระบอบอบชุบดิสเพลสเซอร์มีขนาดเท่ากัน แต่เมื่อทำการเพื่อพื้นที่ผิวภายในสามารถทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นดังรูป 5.8-10 เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนแบบการพาเป็นฟังก์ชันกับพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้กำลังงานที่ได้จากการใช้กระบอบอบชุบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบสูงขึ้นในช่วง 2.4-3.2 วัตต์ และช่วงการทำงานที่กว้างขึ้น 390-760 รอบต่อนาที ได้กำลังงานเฉลี่ย 2.94 วัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพเฉลี่ย 0.46 % เหตุผลที่ทำให้ประสิทธิภาพต่ำ เช่นเดียวกับที่กล่าวในข้อ 6.1.1 รวมถึงปัญหาการรั่วซึมเช่นกัน

6.1.3 ผลจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องยนต์ก่อนและหลังการพัฒนา

จากรูป 5.7 แสดงให้เห็นว่า การพัฒนาเฉพาะการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากเป็นสิ่งสำคัญที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง จากอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนั้น กระบอบอบชุบชนิดไม่มีครีบภายในสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ได้ประมาณ 50.43 เปอร์เซ็นต์ และชนิดมีครีบภายในเพิ่มประสิทธิภาพได้ 83.58 เปอร์เซ็นต์ แม้จะเป็นตัวเลขที่มาก แต่ประสิทธิภาพที่ได้หลังการพัฒนายังไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์

6.1.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะที่ได้จากการใช้กระบอบอบชุบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีครีบและมีครีบภายใน

จากรูป 5.8-10 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มพื้นที่ผิวภายในกระบอบอบชุบดิสเพลสเซอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้เฉลี่ย 66.83 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าขนาดภายในกระบอบอบชุบจะเท่ากัน แต่เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในระบบบออาศัยหลักการพาความร้อน ดังนั้น การเพิ่มพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนจึงทำให้กำลังงานที่ได้เพิ่มขึ้น

6.1.5 ผลของการติดตั้งวาล์ว

ผลของการติดตั้งวาล์วเพื่อถ่ายเทอากาศร้อนออกจากระบบช่วยการระบายความร้อน ผลปรากฏว่า ในจังหวะอัดตัวเครื่องยนต์จะดูดอากาศเย็นจากภายนอกเข้ามา ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นแต่เนื่องจากการรั่วซึมที่ลูกสูบกำลังทำให้อากาศที่ถูกอัด รั่วออกที่จุดนี้ เครื่องยนต์จึงสูญเสียกำลังและหยุดทำงาน

6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในที่นี้ขอกล่าวถึงการพัฒนาข้อบกพร่องในโครงการนี้ ที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขซึ่งอาจเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ได้มากขึ้น ปัญหาที่สำคัญมีดังนี้

1). ปัญหาการรั่วซึมของสารทำงาน จุดสำคัญที่เกิดการรั่วซึม คือ ระยะเวลาของกระบอกสูบและลูกสูบกำลังที่เกิดการสึกหรองจนหลวม เนื่องจากอุปกรณ์ส่วนนี้ถูกออกแบบให้มีพิคัดความเพื่อน้อยมากเพื่อลดแรงเสียดทาน จึงไม่มีแหวนลูกสูบที่อาจทำให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น การพัฒนาที่ส่วนนี้อาจทำได้โดยการคว้านกระบอกสูบและทำลูกสูบกำลังขึ้นใหม่ หรือการใช้แหวนลูกสูบที่มีแรงเสียดทานต่ำสวมที่ลูกสูบ

2). การติดตั้งรีเจนเนอเรเตอร์ จากข้อ 6.1.1 ได้อธิบายผลที่ได้จากรีเจนเนอเรเตอร์ แต่วัสดุที่จะใช้ทำและรูปแบบการติดตั้งขึ้นอยู่กับความเหมาะสม จากจุดทดลองนี้สามารถใช้รีเจนเนอเรเตอร์เป็นดิสเพลสเซอร์ก็ได้โดยต้องคำนึงถึงปริมาตรเปล่าประโยชน์ที่เกิดจากรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยเช่นกัน หากมีมากเกินไปก็จะส่งผลต่อกำลังของเครื่องยนต์



เอกสารอ้างอิง

- [1] Kongtragool B, Wongwiset S., *A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines*. Renew Sust Energy Rev 2003; 7:131-54.
- [2] เสริม จันทร์ฉาย, รศ.ดร. และคณะ, “**ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระบบความร้อนแบบรวมแสงในประเทศไทย**”, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ร่วมกับ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ, ค.ศ. 2006.
- [3] จำเริญ ศรีจันทร์ และ มานพ เหลืองทองวัฒนา, “**การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องยนต์สเตอร์ลิง**”, ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.
- [4] G. Walker, *STIRLING ENGINE*, Oxford University Press, New York, 1980.
- [5] Kongtragool B, Wongwiset S, *Investigation on power output of the gamma-configuration low temperature differential Stirling engines.*, Renew Energy 2005; 30:465-476.
- [6] Kongtragool B, Wongwiset S, *Thermodynamic analysis of a Stirling engine includeing dead volumes of hot space, cold space and regenerator.*, Renew Energy 2006; 31:345-359.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ตารางผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. 1 ผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อใช้กระบอบกสูบคิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีคียบ

ครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)			น้ำหนัก (กก.)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อนาที)	กำลังงานที่ได้ (วัตต์)	ประสิทธิภาพ (%)
	ส่วนร้อน	ส่วนเย็น	ผลต่าง						
1	381.00671	32.2	348.8067114	0.028	0.027468	310	32.46309667	0.891696339	0.148616057
2	383.50166	33.1	350.4016591	0.028	0.027468	317	33.19613433	0.911831418	0.151971903
3	383.00267	34.5	348.5026696	0.027	0.026487	322	33.71973267	0.893134559	0.14885576
4	382.50368	33	349.50368	0.027	0.026487	328	34.34805067	0.909776818	0.15162947
5	384.25014	33.8	350.4501435	0.027	0.026487	334	34.97636867	0.926419077	0.154403179
6	383.50166	32.4	351.1016591	0.026	0.025506	339	35.499967	0.905462158	0.15091036
7	387.74307	32.5	355.2430703	0.026	0.025506	345	36.128285	0.921488037	0.15358134
8	384.49964	31.5	352.9996382	0.026	0.025506	359	37.59436033	0.958881755	0.159813626
9	385.99661	32.5	353.4966069	0.026	0.025506	365	38.22267833	0.974907634	0.162484606
10	386.74509	31.8	354.9450912	0.025	0.024525	371	38.85099633	0.952820685	0.158803448
ค่าเฉลี่ย	384.27509	32.73	352.0303199	0.02625	0.02575125	345.375	36.16755488	0.93036134	0.154106975

ตารางที่ ก. 2 ผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อใช้กระบอกลูกสูบคิสเพลสเซอร์ชนิดมีกริบ

ครั้งที่	อุณหภูมิ			น้ำหนัก (กก.)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)	กำลังงาน (วัตต์)	ประสิทธิภาพ (%)
	ส่วนร้อน	ส่วนเย็น	ผลต่าง						
1	377.0148	33.2	343.814795	0.06	0.0588	390	40.84067	2.401431396	0.400238566
2	371.52591	33.4	338.12591	0.058	0.05684	412	43.14450267	2.452333532	0.408722255
3	378.26227	34.6	343.6622689	0.056	0.05488	450	47.12385	2.586156888	0.431026148
4	379.50974	34.1	345.4097428	0.054	0.05292	487	50.99847767	2.698839438	0.449806573
5	371.7754	35.1	336.6754048	0.053	0.05194	504	52.778712	2.741326301	0.456887717
6	373.02288	35.9	337.1228787	0.052	0.05096	511	53.51174967	2.726958763	0.454493127
7	378.51176	34.9	343.6117637	0.05	0.049	559	58.53829367	2.86837639	0.478062732
8	376.01682	32.4	343.6168159	0.048	0.04704	587	61.47044433	2.891569701	0.481928284
9	373.27237	31.5	341.7723734	0.046	0.04508	622	65.13563267	2.936314321	0.48938572
10	374.76934	31.2	343.5693421	0.045	0.0441	636	66.601708	2.937135323	0.489522554
11	378.76126	32.8	345.9612585	0.043	0.04214	681	71.314093	3.005175879	0.500862647
12	371.7754	32.8	338.9754048	0.041	0.04018	762	79.796386	3.206218789	0.534369798
ค่าเฉลี่ย	375.3515	33.49	343.5693421	0.0441	0.0505	636	66.601708	2.937135323	0.464608843

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองจากโครงการเดิม [3]

ครั้งที่	อัตราส่วนปริมาตร เปล่าประโยชน์	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อนาที)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	กำลังงาน (วัตต์)	ประสิทธิภาพ (%)
1	0.42	510	53.42857143	0.02909	1.55423714	0.07064714
2	0.44	517	54.16190476	0.02909	1.57556981	0.07161681
3	0.43	520	54.47619048	0.02909	1.58471238	0.07203238
4	0.41	552	57.82857143	0.02909	1.68223314	0.07646514
5	0.33	560	58.66666667	0.02601	1.52592	0.06936
6	0.39	563	58.98095238	0.02795	1.64851761	0.07493261
7	0.28	564	59.08571429	0.02795	1.65144571	0.07506571
8	0.29	565	59.19047619	0.02795	1.65437381	0.07519881
9	0.26	567	59.4	0.02795	1.66023	0.075465
10	0.3	568	59.5047619	0.02609	1.55247923	0.07056723
11	0.38	583	61.07619048	0.02909	1.77670638	0.08075938
12	0.37	587	61.4952381	0.02909	1.78889647	0.08131347
13	0.35	592	62.01904762	0.02909	1.80413409	0.08200609
14	0.34	600	62.85714286	0.02909	1.82851428	0.08311428
15	0.32	605	63.38095238	0.02609	1.65360904	0.07516404
	ค่าเฉลี่ย	572.33333	59.95873016	0.02802	1.68068860	0.07639493

ตารางที่ ก. 4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

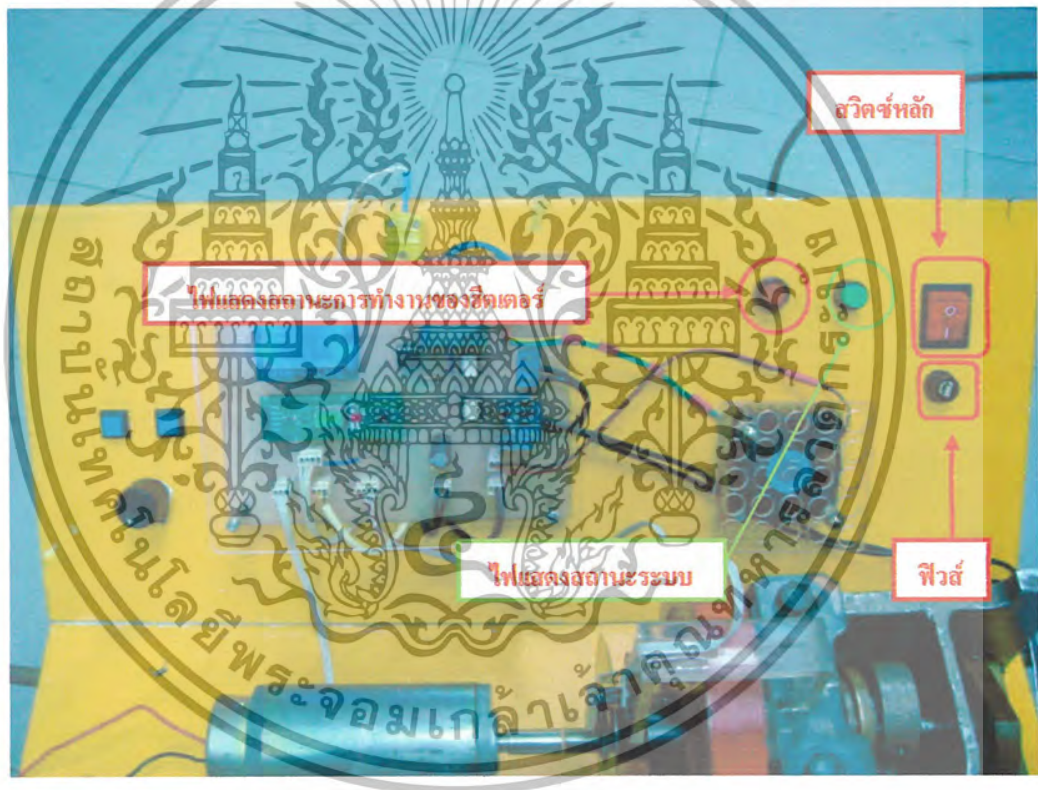
เครื่องยนต์	ความเร็วรอบเฉลี่ย (รอบต่อนาที)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (เรเดียนต่อวินาที)	แรงบิดเฉลี่ย (นิวตัน-เมตร)	กำลังงานเครื่องยนต์เฉลี่ย (วัตต์)	กำลังงานที่ให้ (วัตต์)	ประสิทธิภาพเฉลี่ย (%)	เปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังการพัฒนา (%)	เปรียบเทียบชนิดมีครีปและไม่มีครีป (%)
เครื่องยนต์เดิม	572.33333	59.95873016	0.02802	1.68068860	2200	0.07639493	0	-
ชนิดไม่มีครีป	345.375	36.16755488	0.02575125	0.93036134	600	0.154106975	50.426242987	0
ชนิดมีครีป	636	66.601708	0.0505	2.937135323	600	0.464608843	83.5771511	66.83081321

ภาคผนวก ข. วิธีการใช้งานชุดทดลอง

1. การติดตั้งชุดทดลอง

1.1 ก่อนทำการเสียบปลั๊ก ให้แน่ใจว่าสวิตช์หลักของเครื่องปิดอยู่ แล้วจึงทำการเสียบปลั๊ก

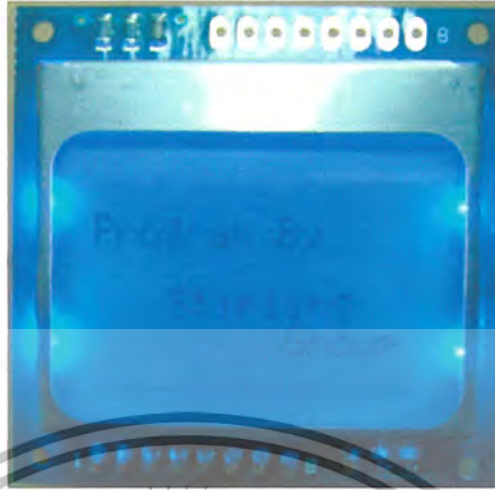
1.2 เปิดสวิตช์หลัก จะเห็นไฟสีเขียวที่ชุดทดลองติดสว่าง ซึ่งหมายถึงระบบไฟฟ้าทำงานตามปกติ แต่ถ้าไฟสีเขียวไม่ติดแสดงว่าปลั๊กหลวม หรือฟิวส์ขาด ให้ทำการเช็คและแก้ไขที่ละจุด



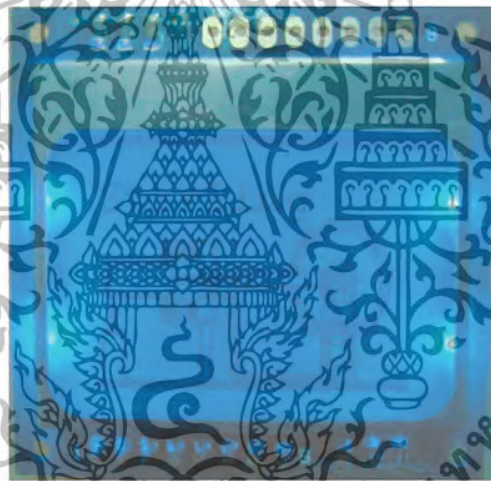
รูปที่ ข.1 ตำแหน่งสวิตช์ ฟิวส์ และหลอดไฟแสดงสถานะการทำงาน

1.3 ที่หน้าจอแสดงผล จะแสดงข้อความดังรูป ข. 2 และรูปภาพโลโก้ดังรูป ข. 3 แสดงว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้ตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 จอแสดงผลแสดงข้อความเริ่ม โปรแกรม



รูปที่ ข.3 จอแสดงผลแสดงโลโก้ของโปรแกรม

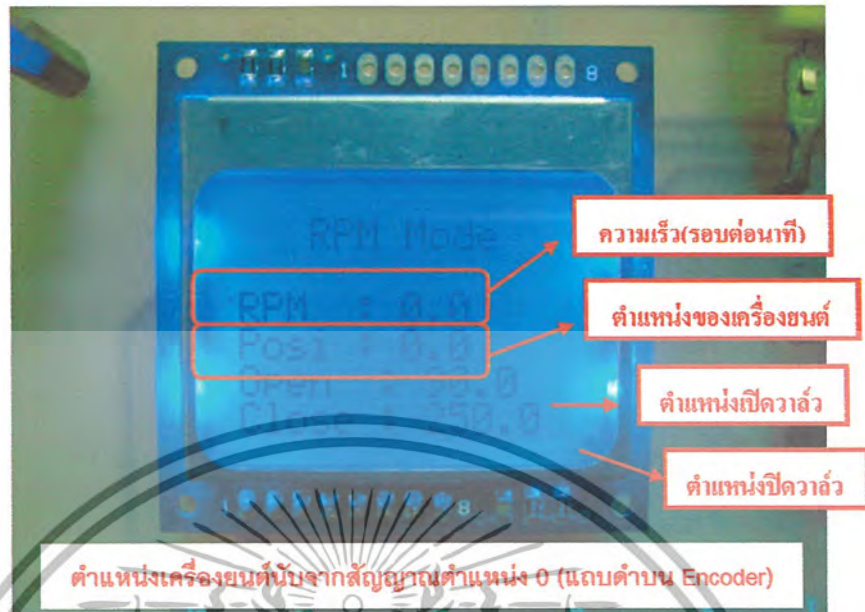
2. การใช้งานชุดทดลอง

2.1 รายละเอียดโปรแกรม

โปรแกรมแบ่งออกเป็นสองโหมดด้วยกัน ดังนี้

- 1). โหมดแรก เป็นโปรแกรมสำหรับอ่านค่าความเร็วของรถยนต์หน่วยเป็นรอบต่อนาที และ โปรแกรมสำหรับควบคุมตำแหน่งการเปิดปิดวาล์วของเครื่องยนต์ โดยใช้สัญญาณเดียวกันจากอุปกรณ์วัดความเร็วรอบซึ่งจะมีตัวบอกตำแหน่งของรอบการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 โปรแกรมโหมดแรก

2). โหมดที่สอง เป็น โปรแกรมสำหรับควบคุมความร้อนของฮีตเตอร์หน่วยเป็นวัตต์ และ โปรแกรมแสดงผลอุณหภูมิของเครื่องยนต์ฝั่งร้อนและฝั่งเย็น



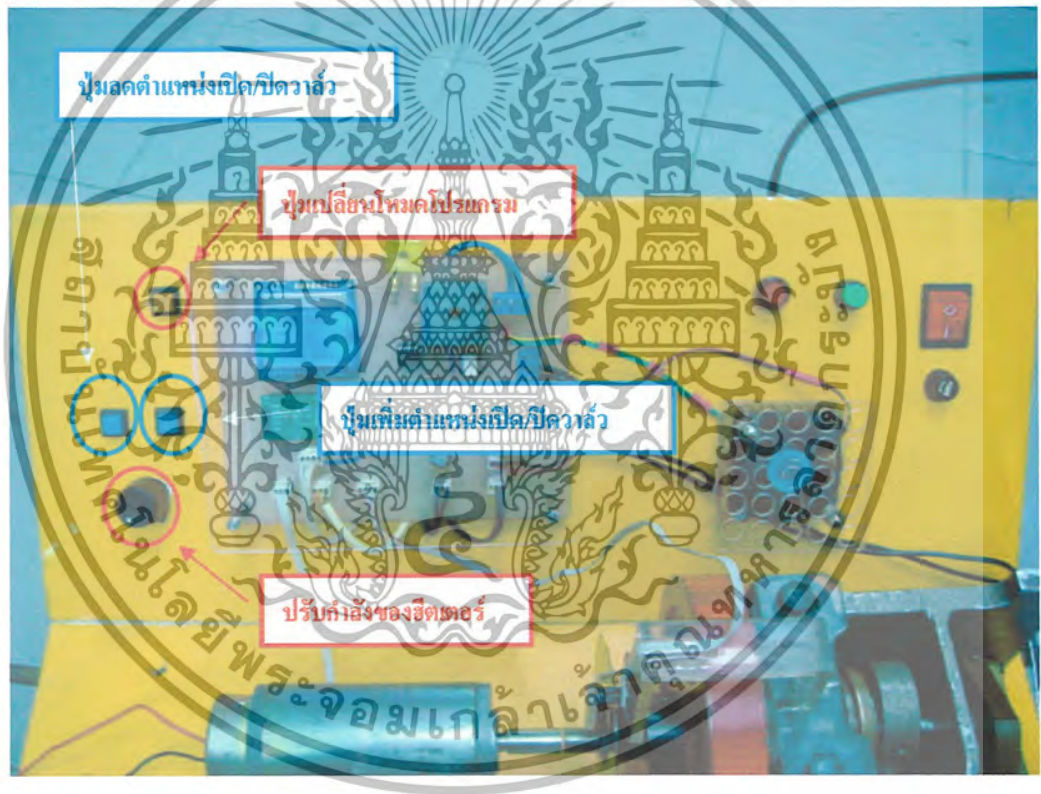
รูปที่ ข.5 โปรแกรมโหมดที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเปลี่ยนโหมด ทำได้ด้วยการกดปุ่มสี่เหลี่ยม 1 ครั้ง

2.3 การเซตค่าตำแหน่งเปิดปิดวาล์ว ทำได้ดังนี้

- 1). กดปุ่มสี่เหลี่ยมพร้อมกันสองปุ่มในโหมดแรก จะเข้าสู่โปรแกรมการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการเปิดวาล์ว
- 2). กดปุ่มสี่เหลี่ยม 1 ครั้งเพื่อโปรแกรมการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการปิดวาล์ว
- 3). กดปุ่มสี่เหลี่ยมซ้ายเพื่อลดและกดปุ่มสี่เหลี่ยมขวาเพื่อเพิ่มตำแหน่งของการเปิดปิดวาล์ว
- 4). กดปุ่มสี่เหลี่ยม 1 ครั้งเพื่อออกจากโปรแกรมการปรับตำแหน่งการเปิดปิดวาล์ว



รูปที่ ข. 6 ตำแหน่งปุ่มควบคุมการทำงานของเครื่อง

2.4 การปรับกำลังของฮีตเตอร์ กดปุ่มสี่เหลี่ยมเข้าสู่โหมดที่ 2 จากนั้น สามารถปรับกำลังของฮีตเตอร์โดยการหมุนตัวต้านทานปรับค่าได้ ค่ากำลังของฮีตเตอร์สามารถดูได้จากหน้าจอแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

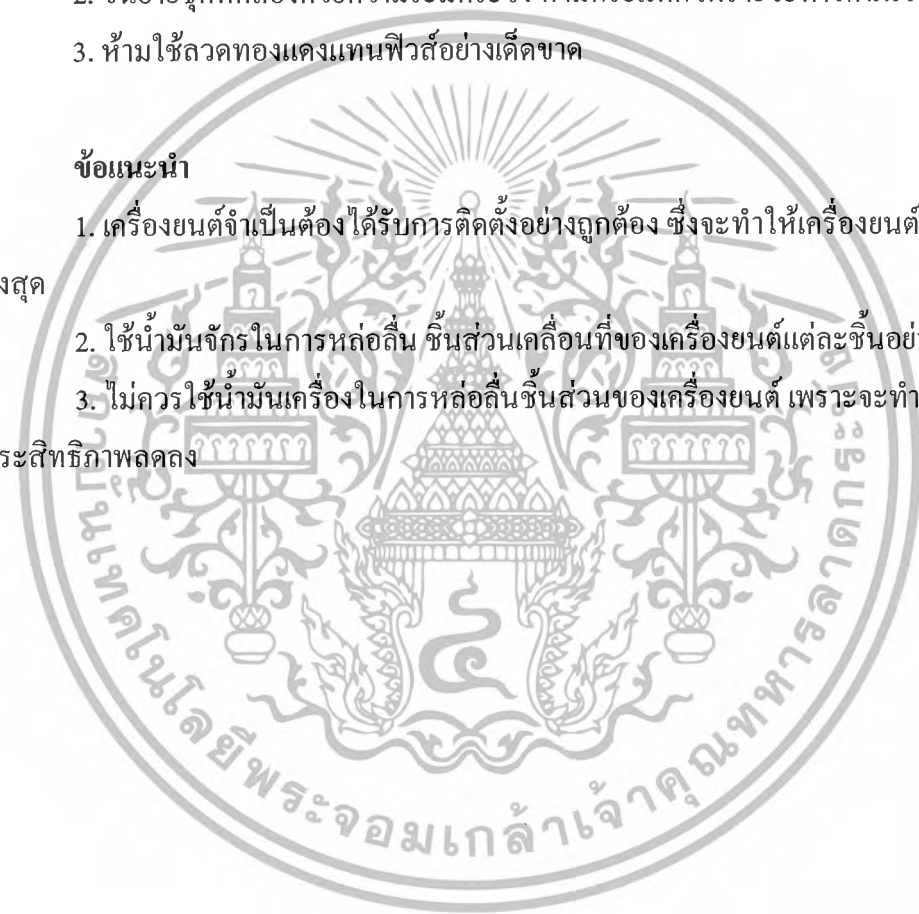
2.5 ไฟสีแดง แสดงการทำงานของฮีตเตอร์ โดยความสว่างของหลอดไฟจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับกำลังที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์

ข้อควรระวัง

1. ในขณะที่เสียบปลั๊ก ไม่ว่าจะเปิดหรือปิดสวิตซ์ก็ตาม ไม่ควรเข้าใกล้แผงวงจรควบคุม และ บริเวณสายไฟด้านหลังแผงควบคุม เพราะในขณะที่เสียบปลั๊ก ถึงแม้จะปิดสวิตซ์ก็ตาม ไฟฟ้าแรงสูง ยังคงไหลอยู่ภายในวงจรไฟฟ้า
2. ขนย้ายชุดทดลองด้วยความระมัดระวัง ห้ามกระแทก เพราะจะทำให้ฉนวนปูนแตก
3. ห้ามใช้ลวดทองแดงแทนฟิวส์อย่างเด็ดขาด

ข้อแนะนำ

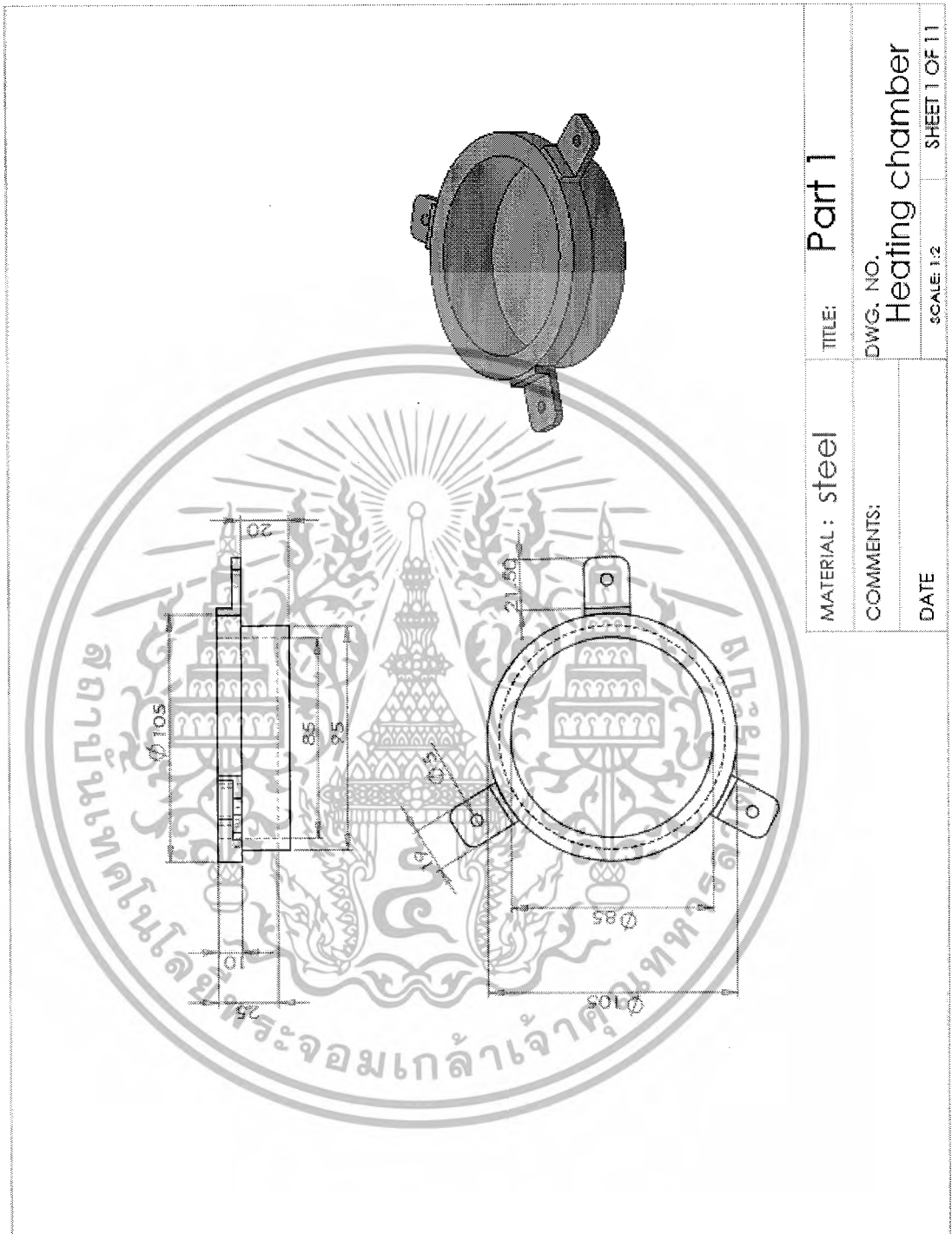
1. เครื่องยนต์จำเป็นต้องได้รับการติดตั้งอย่างถูกต้อง ซึ่งจะทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูงสุด
2. ใช้น้ำมันจักรในการหล่อลื่น ชิ้นส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์แต่ละชิ้นอย่างสม่ำเสมอ
3. ไม่ควรใช้น้ำมันเครื่องในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ เพราะจะทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพลดลง





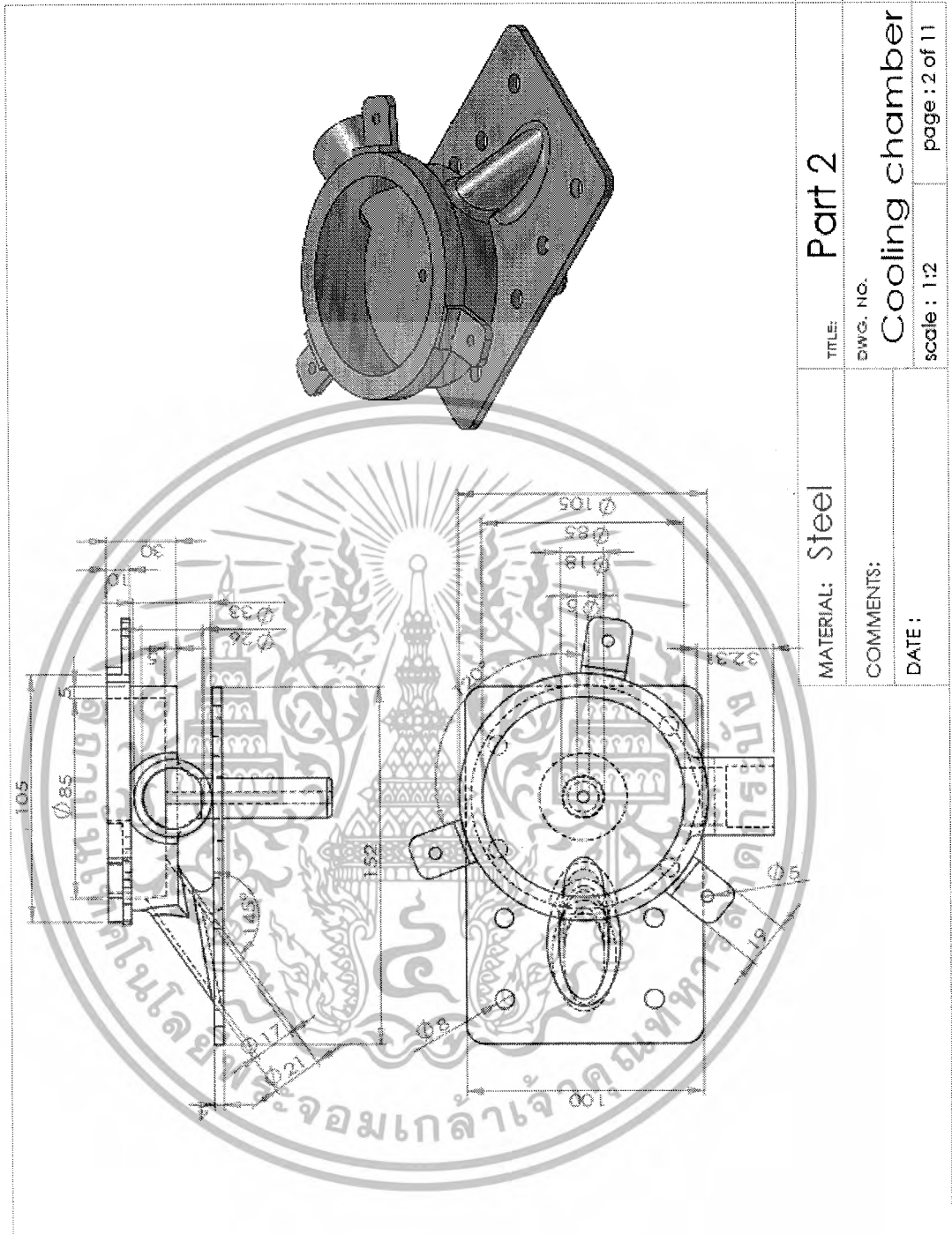
ภาคผนวก ก.
แบบเขียน และขนาดส่วนประกอบต่างๆของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



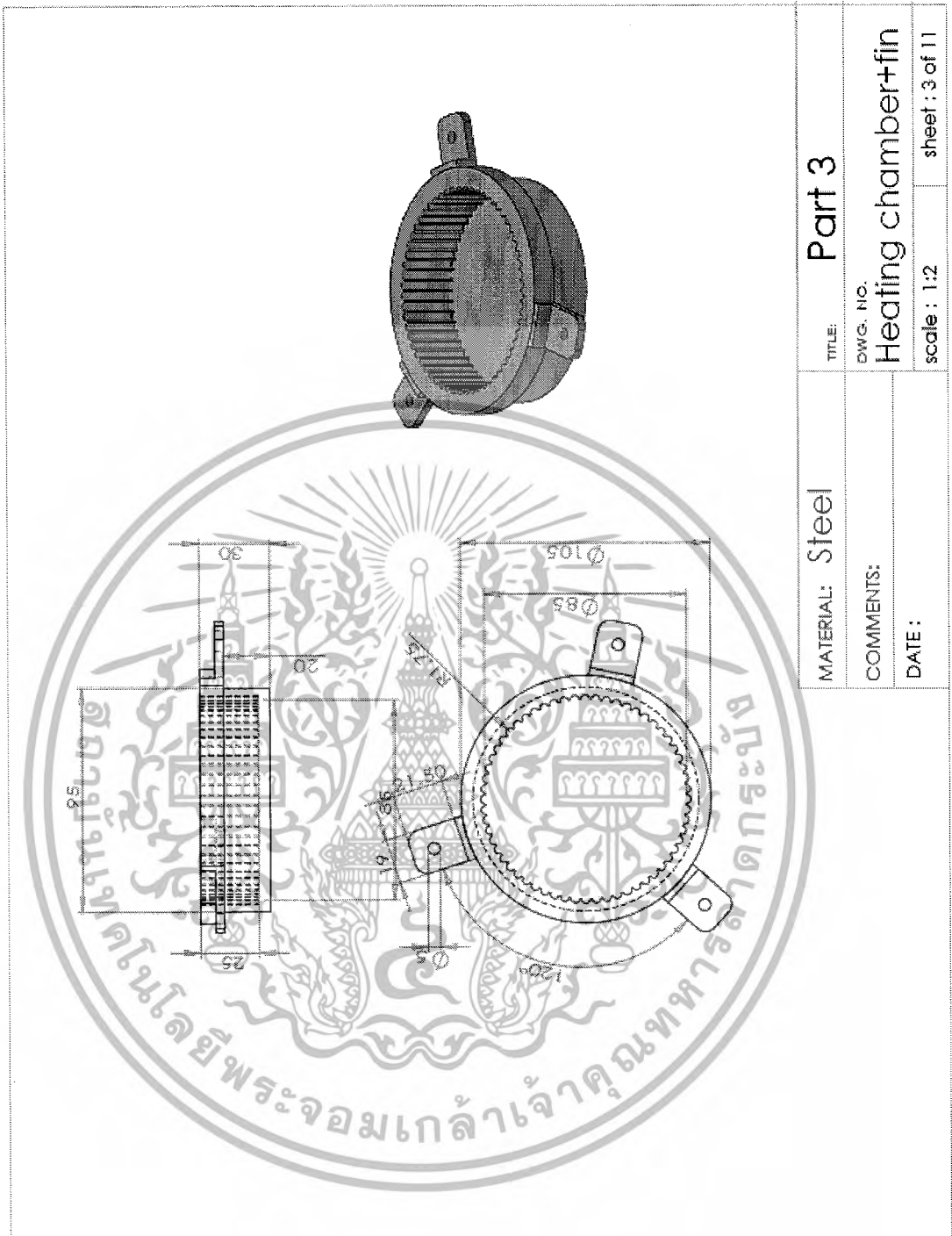
รูปที่ ก. 1 แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ส่วนร้อนแบบไม่มีครีป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



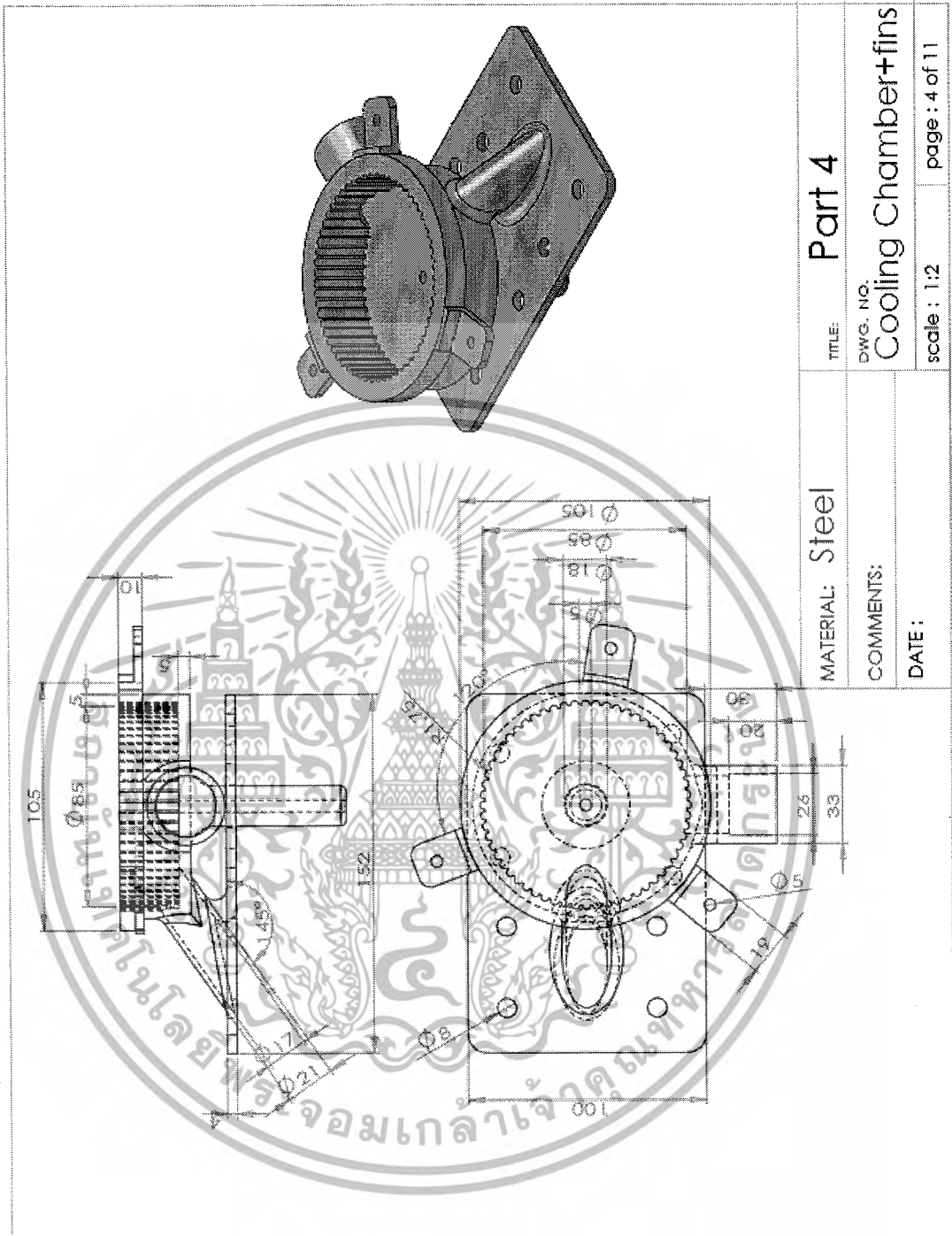
รูปที่ ค. 2 แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ส่วนเย็นพร้อมฐานรองแบบไม่มีคียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค. 3 แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ส่วนร้อนแบบมีครีป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค. 4 แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์ส่วนยื่นพร้อมฐานรองแบบมีคียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TITLE: Part 5

DWG. NO.

scale : 1:2

Insulator

sheet : 5 of 11

MATERIAL: Cement

COMMENTS:

DATE:

รูปที่ ค. 5 แบบเขียนและขนาดของฉนวนกันความร้อน

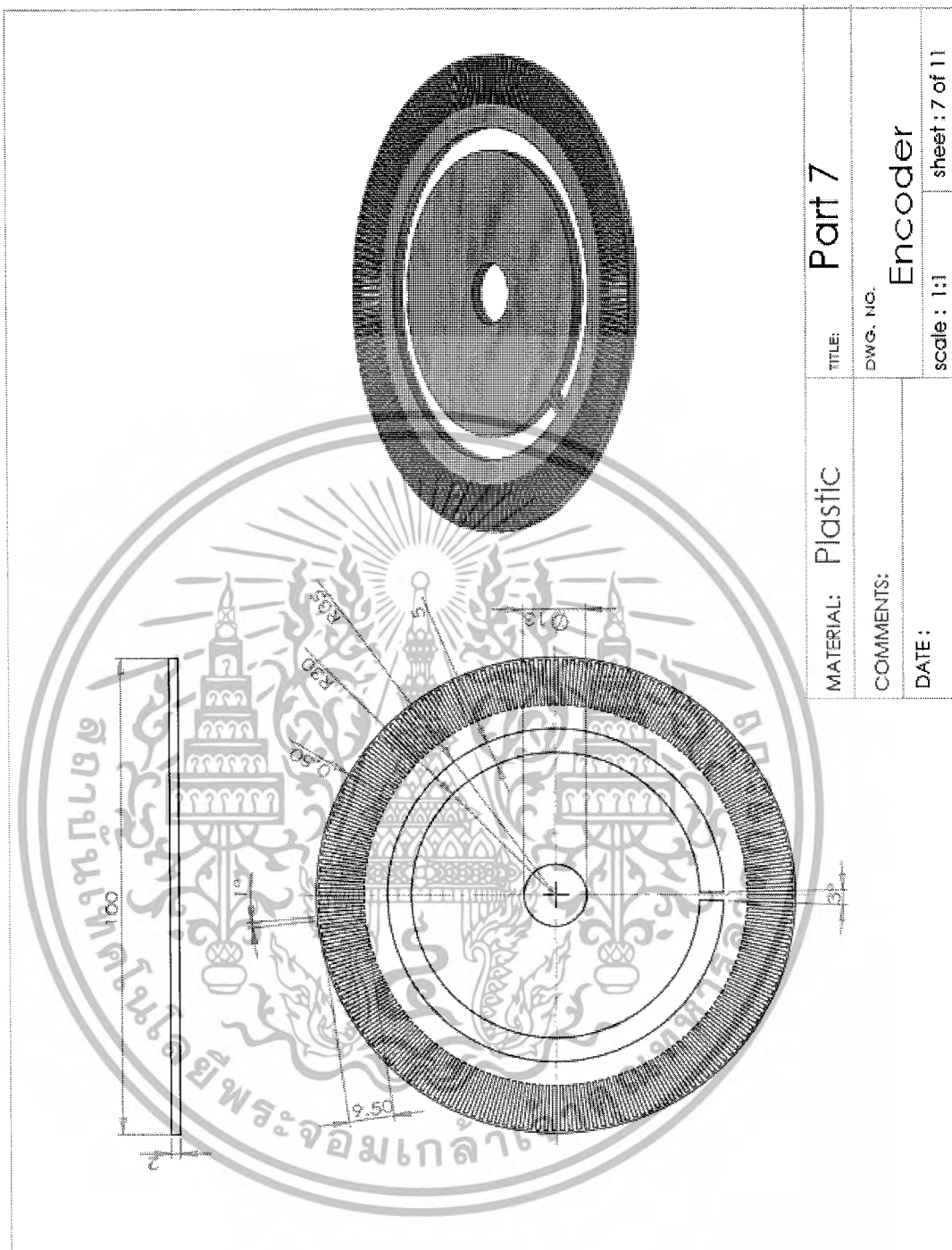
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MATERIAL: Gasket	TITLE: Part 6
COMMENTS:	DWG. NO. Gasket
DATE:	scale : 1:2 sheet : 6 of 11

รูปที่ ค. 6 แบบเขียนและขนาดของแผ่นประเก็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



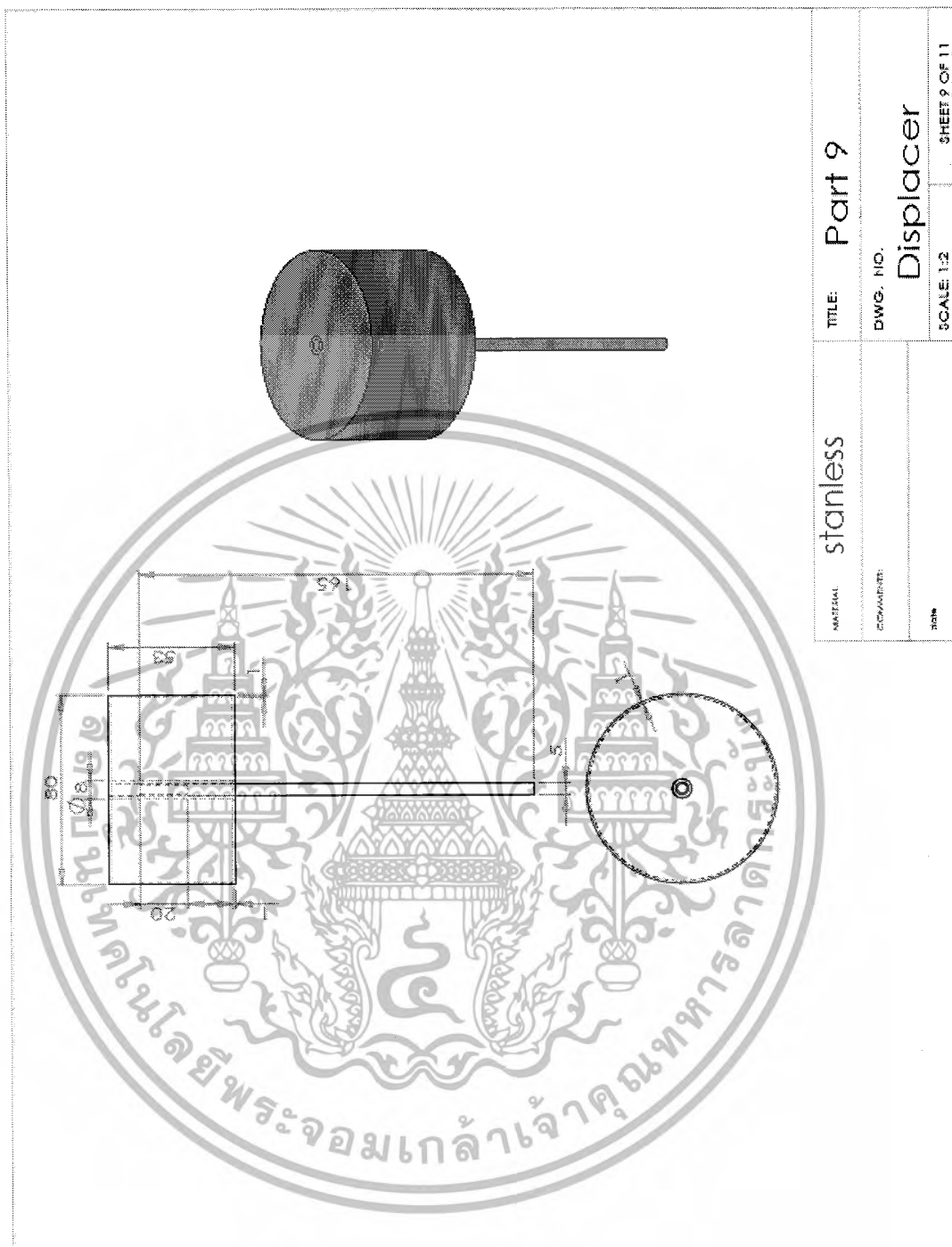
รูปที่ ค. 7 แบบเขียนและขนาดของเอ็น โคดเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



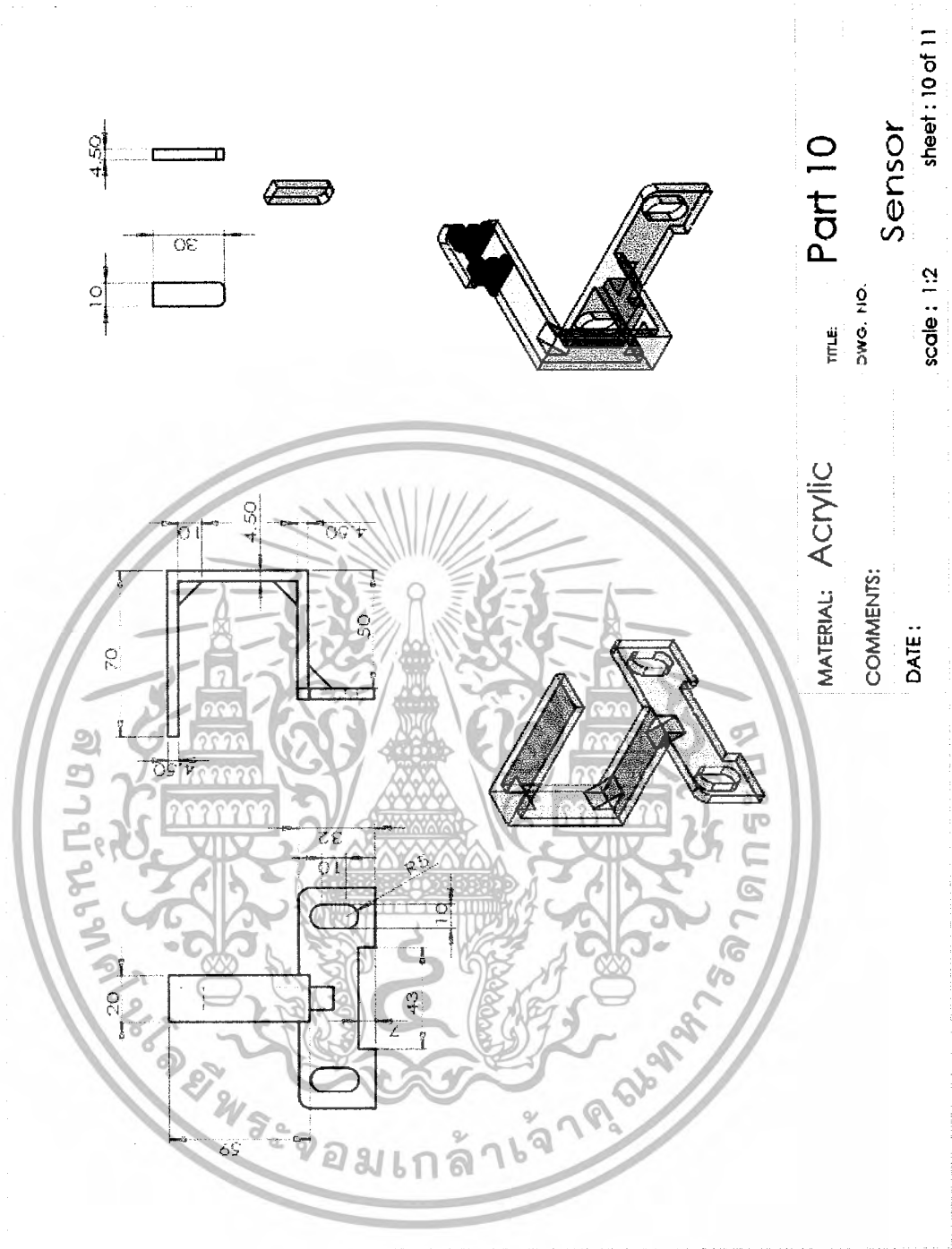
รูปที่ 8 แบบเขียนและขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งเอ็นโคเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค. 9 แบบเขียนและขนาดของดีสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค. 10 แบบเขียนและขนาดของชุดเซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสำหรับพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์¹

ศันยา ชูวรเชษฐ์², วิเชียร สุวัฒน์พูนลาภ², สุเทวินทร์ แพงทรัพย์², ดำริห์ จันทร์แสงสุข³, จารุวัตร เจริญสุข⁴

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยพัฒนาการแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น และสามารถเข้ากับแหล่งพลังงานภายนอกได้ เช่น ความร้อนจากการเผาไหม้ หรือพลังงานแสงอาทิตย์ ผลจากการคำนวณด้วยทฤษฎีได้ขนาดกระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 85 มม. ความยาวภายใน 88 มม. และดีเซลเพลสเซอร์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 80 มม. ยาว 53 มม. ทำการทดลองโดยใช้แหล่งความร้อนจากขดลวดความร้อนขนาด 600 วัตต์ โดยกำลังงานที่คิดจากค่าเฉลี่ยที่สภาวะสมดุล จากการทดสอบประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดความเร็วรอบที่ทดสอบเป็น 0.46 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงการเดิม [3] พบว่าการพัฒนาของโครงการนี้เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ 83.58 เปอร์เซ็นต์ และสามารถใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากภายนอกได้ ส่วนการติดตั้งวาล์วผลปรากฏว่าไม่สามารถทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้เนื่องจากปัญหาการรั่วซึมของอากาศที่ถูกสูบกักในจังหวะอัดตัว เครื่องมือที่ใช้วัดค่าต่าง ๆ เป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาเองได้แก่ เครื่องมือวัดรอบ เทอร์โมมิเตอร์ เครื่องมือวัดแรงบิด และอุปกรณ์ควบคุมวาล์ว

Abstract

This project presents a study and development work on Stirling engine for efficiency; improvement by modifying the heat exchanger unit and can be used with external heat source such as combustion, or solar thermal. Using the theory such calculation suggest that the engine; dimensions are as follow; displacer cylinder internal diameter 85mm, displacer cylinder length 88mm, displacer diameter 80mm and length 53mm. Finally, the engine was tested for its performance; the 600W resistance wire was used as a heat source. We have made an average on power output of the engine over entire operating condition and found that, the overall efficiency was 0.46 percent. Compared with the previous development, the efficiency had been improved for about 83.58 percent and it can be used with external heat source. However, the engine with installation of electronic valve failed to operate because of a leakage take place during the compression stroke. The measuring instrument in this project is made by our team which are tachometer, thermometer, torque meter and valve controller. © 2008 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserved.

Keywords: Stirling engine; Efficiency; Displacer; Valve.

1. บทนำ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถูกสร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1816 โดย โรเบิร์ต สเตอร์ลิง [4] ในประเทศสกอตแลนด์ ประมาณ 80 ปี ก่อนที่จะมีการสร้างเครื่องยนต์ดีเซล ในขณะนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้รับความนิยมอย่างมากจนกระทั่งต้นทศวรรษที่ 1900 ได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในและพลังงานไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ทำให้การพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้หยุดลงเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานตามวัฏจักรสเตอร์ลิงซึ่งเป็นระบบปิดมีการอัดและขยายตัวของสารทำงาน เป็นวัฏจักรการไหลถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนรูปจากพลังงานความร้อนเป็นพลังงานทางกลเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นกลไกที่ทำงานแบบอุดมคติภายใต้ วัฏจักรสเตอร์ลิง หรือภายใต้ทฤษฎีที่เหมาะสม สำหรับของไหลที่อัดตัวได้ เช่น อากาศ, ไฮโดรเจน, ฮีเลียม, ไนโตรเจน หรือ แม้แต่ไอน้ำ ทั้งหมดนี้สามารถนำมาใช้เป็นสารทำงานได้ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถให้ประสิทธิภาพที่สูงได้ โดยมีมลพิษจากแก๊สไอเสียต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน และที่สำคัญ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงออกแบบและสร้างได้ง่าย รวมถึงมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในยุคแรก มีประสิทธิภาพที่ต่ำมาก อย่างไรก็ตาม ตลอดเวลาที่ผ่านมา ก็มีเครื่องยนต์สเตอร์ลิงใหม่ๆ ได้ถูกพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เครื่องยนต์รุ่นใหม่มีมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถทำงานกับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิที่สูงได้ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้

¹ชื่อภาษาอังกฤษ “Stirling engine for solar application”

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197

⁴รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร 0 2326 4197, อีเมล kcjaruw@kmitl.ac.th

สัญลักษณ์			
V_S		ปริมาตรเปล่าประโยชน์ (dead volume, cm^3)	
D_D	เส้นผ่านศูนย์กลางดิสเพลสเซอร์	V_{\max}	$V_D + V_P$ คือ ปริมาตรสูงสุดของระบบ (cm^3)
D_P	เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบกำลัง	V_{\min}	V_D คือ ปริมาตรต่ำสุดของระบบ (cm^3)
F	ค่าคงที่ในช่วง 0.25-0.35	W	งาน (joule)
F_T	แรง (นิวตัน)	d_m	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบ (mm)
L_D	ความยาวดิสเพลสเซอร์	k_p	V_p/V_D คือ อัตราส่วนปริมาตรกวาด (swept volume ratio)
L_{ex}	ความยาวภายในของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์	k_S	V_S/V_D คือ อัตราส่วนปริมาตรเปล่าประโยชน์ (dead volume ratio)
N	สัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (safety factor)	l_D	ระยะชักดิสเพลสเซอร์ (displacer stroke, mm)
P	กำลังงาน (watt)	l_p	ระยะชักลูกสูบกำลัง (power piston stroke, mm)
Q	พลังงานความร้อน (watt)	P_{\max}	ความดันสูงสุดในระบบ (Pa)
R	ค่าคงที่จำเพาะของอากาศ = $0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$	P_{\min}	ความดันต่ำสุดในระบบ (Pa)
S	เอนโทรปี (entropy, $\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	r	V_{\max}/V_{\min} คือ อัตราส่วนการอัด (compression ratio)
T	แรงบิด (N-m)	η_r	ระยะระหว่างแกนแกนเนอร์เรเตอร์ถึงตาดัง
T_C	อุณหภูมิส่วนเย็นของเครื่องยนต์ (cooler temperature, $^{\circ}\text{C}$, K)	t	ความหนาของผนังกระบอกสูบ (mm)
T_H	อุณหภูมิส่วนร้อนของเครื่องยนต์ (heater temperature, $^{\circ}\text{C}$, K)		สัญลักษณ์กรีก (Greek symbols)
V_D	ปริมาตรกวาดของดิสเพลสเซอร์ (displacer swept volume, cm^3)	α	มุมระหว่างดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง (phase angle, degree)
V_P	ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง (power piston swept volume, cm^3)	σ	ค่าความแข็งแรงจุดครากของวัสดุ (yield strength, MPa)
		τ	T_C/T_H คือ อัตราส่วนอุณหภูมิต่ำ

แหล่งความร้อนจากภายนอก ดังนั้นจึงสามารถใช้กับแหล่งความร้อนใด ๆ ก็ได้ รวมถึงความร้อนจากการเผาไหม้วัสดุต่าง ๆ ได้เช่นขยะ ตอซังข้าว สารชีวมวล และ พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ได้ โดยการรวมแสงไปยังส่วนรับความร้อนของเครื่องยนต์และจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานกลได้โดยตรง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้การเผาไหม้ได้โดยจะเป็นการเผาไหม้ที่ต่อเนื่อง ทำให้การเผาไหม้สะอาดกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายใน และใช้เชื้อเพลิงได้ทุกรูปแบบ ทุกระดับคุณภาพ ด้วยโครงสร้างและกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายและมีลักษณะเป็นลูกสูบเหมือนเครื่องยนต์สันดาปภายใน การใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าในช่วง 1-100 kWe เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด [3] แม้ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมีประสิทธิภาพต่ำ แต่ก็มีความปลอดภัยในการทำงานสูงและราคาถูก

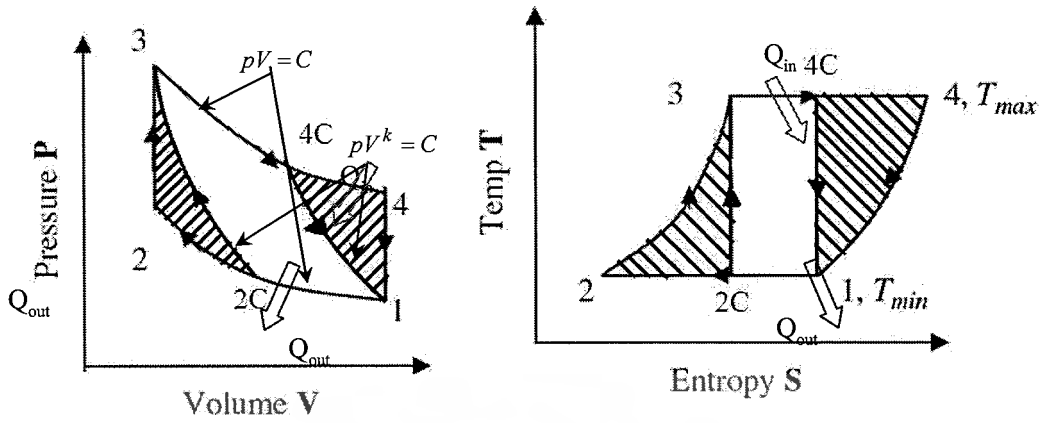
2. วิจัยการและการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง [1]

2.1 กระบวนการการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 1-2 (สารทำงานถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่ำออกนอกระบบ)

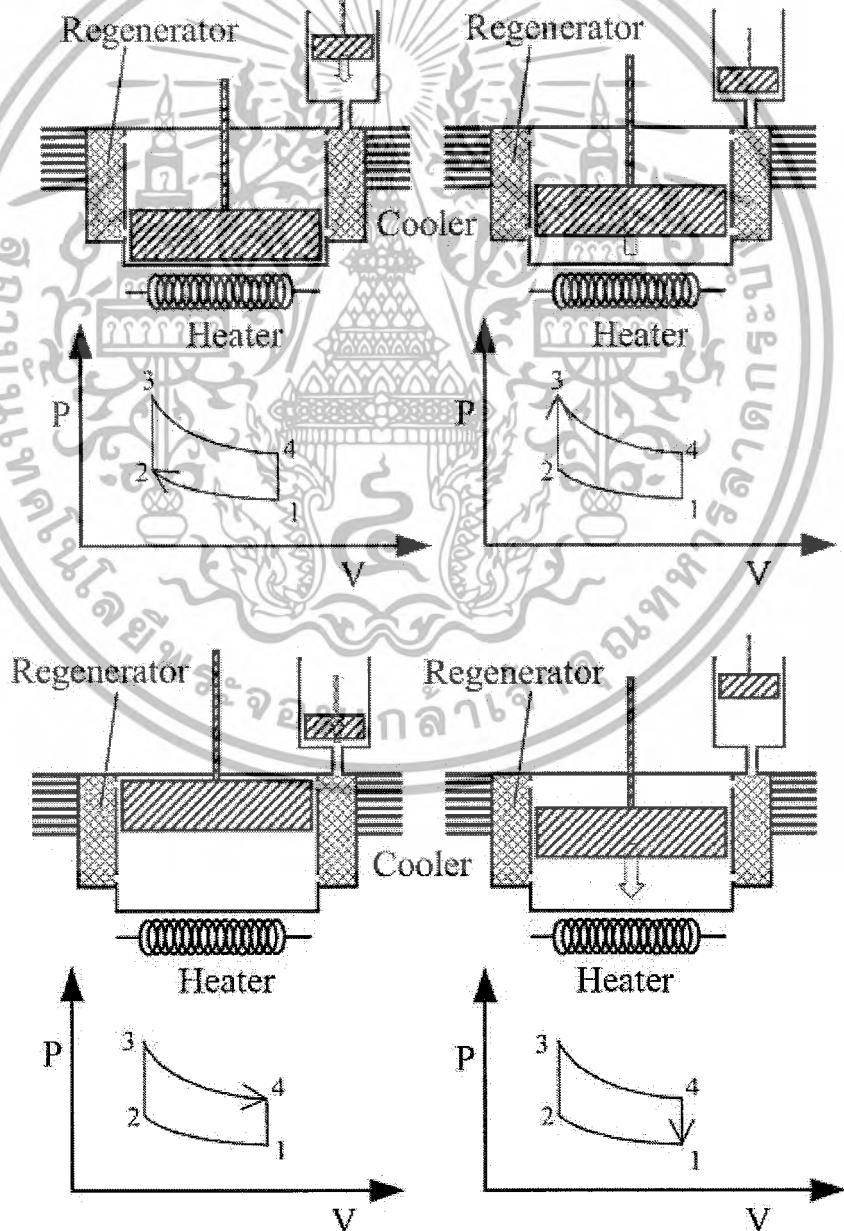
หลังจากที่ดิสเพลสเซอร์ดันสารทำงานเข้าสู่ส่วนเย็นแล้ว จะอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน (TDC) ซึ่งสารทำงานจะถูกทำให้เย็น ที่สภาวะนี้เป็นสภาวะที่ 1 และมีความดันเป็น p_1 ลูกสูบกำลัง จะเริ่มเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่าง (BDC) ไปยังศูนย์ตายบน (TDC) โดยแรงเฉื่อยจากล้อตุ้มกำลัง (fly wheel) และแรงดูดที่เกิดจากสารทำงานเย็นตัวลง (vacuum) ทำให้สารทำงานถูกอัดจากสภาวะ 1 ไปยัง 2 เข้าใกล้ศูนย์ตายบน (TDC) โดยที่มีอุณหภูมิต่ำที่ให้แก่สารทำงานนี้คือพื้นที่ใต้กราฟของกระบวนการ 1-2

2.2 กระบวนการให้ความร้อนที่ปริมาตรคงที่ 2-3 (รีเจนเนอเรเตอร์ถ่ายเทความร้อนให้สารทำงาน)

ดิสเพลสเซอร์กำลังเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบน (TDC) ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) และถ่ายเทสารทำงานจาก (TDC) เพื่อการเพิ่มความดันจากการขยายตัวของสารทำงาน ส่วนเย็นมายังส่วนร้อน โดยที่ลูกสูบกำลังยังอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน และดิสเพลสเซอร์จะดันสารทำงานเข้าสู่ส่วนร้อนโดยผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งได้เก็บความร้อนไว้ถูกถ่ายเทให้สารทำงาน ทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นจาก 2 ไปยัง 3 โดยมีปริมาตรคงที่



รูป 1 วัฏจักรสเตอร์ลิงและวัฏจักรคาร์โนท์



รูป 2 การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 3-4 (ความร้อนจากภายนอกระบบถ่ายเทให้สารทำงาน)

หลังจากดิสเพลสเซอร์ได้ดันสารทำงานทั้งหมดไปยังส่วนร้อน และหยุดอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (BDC) เพื่อให้ความดันในระบบเพิ่มถึงจุดสูงสุดเป็น p_4 ในขณะที่กระบวนการที่ 3-4 ยังอยู่ในส่วนร้อน

ลูกสูบกำลังเริ่มจะเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบน (TDC) ไปยังศูนย์ตายล่าง(BDC) จากความดันที่เพิ่มขึ้น และส่งกำลังไปยังล้อตุนกำลัง (fly wheel) ทำให้ได้กำลังงาน ซึ่งกำลังงานจากจังหวะนี้ จะทำให้เกิดการทำงานจนครบวัฏจักร และงานในส่วนนี้หาได้จาก พื้นที่ใต้กราฟ 3-4

2.4 กระบวนการคายความร้อนที่ปริมาตรคงที่ 4-1 (สารทำงานถ่ายเทความร้อนให้รีเจนเนอเรเตอร์)

หลังจากที่ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ไปถึงศูนย์ตายล่าง (BDC) และส่งกำลังไปยังล้อตุนกำลัง (fly wheel) แล้ว ก็จะคงอยู่กับที่และพร้อมจะเคลื่อนที่สู่ศูนย์ตายบน (TDC) โดยแรงเฉื่อยจากล้อตุนกำลัง (fly wheel) และแรงดูดที่เกิดจากความดันที่ลดลง ในขณะที่ดิสเพลสเซอร์กำลังเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่าง(BDC)ไปยังศูนย์ตายบน (TDC) และถ่ายเทสารทำงานไปสู่ส่วนเย็น โดยผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ สารทำงานจึงถ่ายเทความร้อนให้รีเจนเนอเรเตอร์ ทำให้ความดันลดลงและเกิดแรงดูด ทำให้อุณหภูมิและความดันของสารทำงานลดลงจากสภาวะ 4 ไป 1 โดยมีปริมาตรคงที่

3 การออกแบบและการคำนวณ

3.1 การออกแบบดิสเพลสเซอร์

ปริมาตรกวาด (swept volume) ของดิสเพลสเซอร์สามารถหาได้จากการคำนวณกราฟอุณหภูมิ-ความดัน (p-V diagram) โดยการกำหนดอัตราส่วนความดัน $p_{max} / p_{min} = 2$ เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีความดันในระบบแตกต่างกันประมาณสองเท่า [4] และคำนวณหาอัตราส่วนปริมาตรกวาด (swept volume ratio, V_D / V_P) เมื่อทราบปริมาตรลูกสูบกำลัง และอีกวิธีก็คือการกำหนดอัตราส่วนปริมาตรกวาด โดยมีค่าประมาณ 1.5 ขึ้นไป [6]

ดังนั้นปริมาตรกวาด (swept volume) ของดิสเพลสเซอร์ ที่ใช้ในการทดลองนี้ จึงใช้การกำหนดอัตราส่วนปริมาตรกวาดเท่ากับ 1.5 และสามารถคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดิสเพลสเซอร์ได้ดังนี้

$$\frac{V_D}{V_P} = 1.5 \quad (1)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของดิสเพลสเซอร์หาได้จาก

$$D_D = \sqrt{\frac{V_D}{\pi d_D / 4}} \quad (2)$$

และความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์จะขึ้นกับการออกแบบห้องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อลดช่องว่างในกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (dead volume) ให้น้อยที่สุด

3.2 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์มีค่าใกล้เคียงกับลูกสูบดิสเพลสเซอร์ เพื่อลดช่องว่างในกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และให้มีช่องว่างในการถ่ายเทอากาศ แต่ต้องมีขนาดไม่ใหญ่เกินไป เพราะจะเป็นการเพิ่ม dead volume (V_D) ซึ่งส่งผลต่อกำลังงานของเครื่องยนต์

วัสดุที่ใช้ทำกระบอกสูบคือเหล็กเหนียว โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนและใช้วงแหวนที่ทำจากซีเมนต์ดัดกลาง เพื่อลดการนำความร้อนจากส่วนร้อนไปส่วนเย็น ดังรูป 3 โดยใช้เพลตตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm กิ่งคว้านให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 85 mm ลึกประมาณ 25 mm และความหนาของกระบอกสูบหาได้จากสมการ

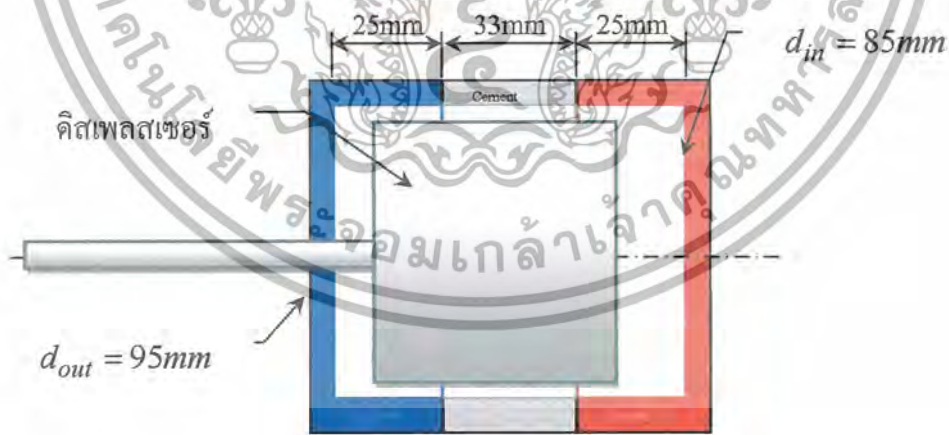
$$\sigma = \frac{pd}{2t} \quad (3)$$

จากตารางคุณสมบัติของวัสดุ ใช้ความแข็งแรงจุดคราก (yield strength) ของเหล็ก $\sigma_y = 250MPa$ และกำหนดให้สัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (safety factor, N) เท่ากับ 7 เมื่อพิจารณาผลจากความดันภายในและอุณหภูมิ ดังนั้น ค่าความแข็งแรงจุดครากในการออกแบบ $\sigma' = 35.7MPa$ ที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1

ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่พัฒนา

ประเภทเครื่องยนต์	γ -type-Stirling
ลูกสูบกำลัง	
เส้นผ่านศูนย์กลาง	51 มม.
ความยาว	51 มม.
ระยะชัก	45 มม.
ปริมาตรกวาด	92 ซม. ³
ดิสเพลสเซอร์	
เส้นผ่านศูนย์กลาง	80 มม.
ความยาว	53 มม.
ระยะชัก	25 มม.
ปริมาตรกวาด	140 ซม. ³
กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์	
ความหนาของผนังกระบอก	10 มม.
สูบดิสเพลสเซอร์	
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	85 มม.
ความยาวภายใน	88 มม.
แหล่งความร้อน	ขดลวดความร้อนขนาด 600 วัตต์
อุณหภูมิแหล่งความร้อน	~380 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิหล่อเย็น	~33 องศาเซลเซียส



รูป 3 ขนาดของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์

3.3 การออกแบบฉนวนกันความร้อน

กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ถูกออกแบบโดยแยกเป็นสองส่วน และใช้วัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อนคั่นกลางเพื่อลดการนำความร้อนจากส่วนร้อนไปยังส่วนเย็น วัสดุที่เลือกใช้คือซีเมนต์ โดยกำหนดความยาวของซีเมนต์ ดังนั้น ความยาวของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ทำได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (4)

กำหนดระยะเพื่อภายในประมาณ 10mm ตามแกนก้านสูบเมื่อกระบอกส่วนหัวและท้ายไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงการนำความร้อนจากส่วนร้อนไปยังส่วนเย็น ทำได้โดยเพิ่มความยาวของฉนวนซึ่งทำให้ dead volume ในระบบเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น การลด dead volume ต้องเพิ่มความยาวของดิสเพลสเซอร์ จึงกล่าวได้ว่าความยาวของดิสเพลสเซอร์ขึ้นกับความยาวของฉนวน



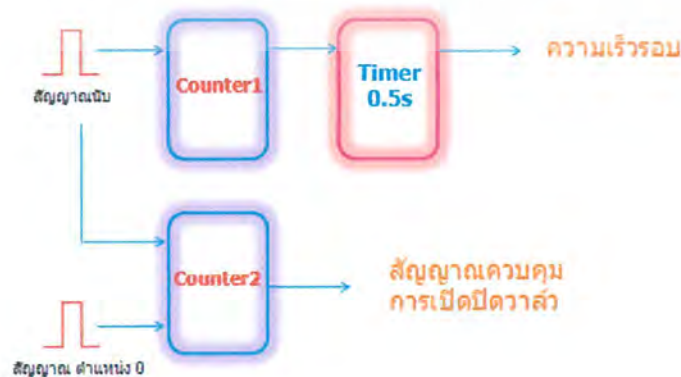
รูป 4 กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์แบบมีคืบก่อนการประกอบ

3.4 เครื่องมือวัดรอบ (Tachometer)

เครื่องมือวัดรอบเป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเองนี้ จากรูป 5 เป็นแผ่นโรตารีที่ทำขึ้นเองจากแผ่นซีดี โดยลอกชั้นข้อมูลบนแผ่นซีดีออก แล้วนำแผ่นโค้ดที่ถ่ายเอกสารลงบนกระดาษมาติดไว้ ซึ่งมีช่องว่าง 180 ช่องต่อหนึ่งรอบ



รูป 5 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดรอบและแผ่นโรตารีที่ทำเอง



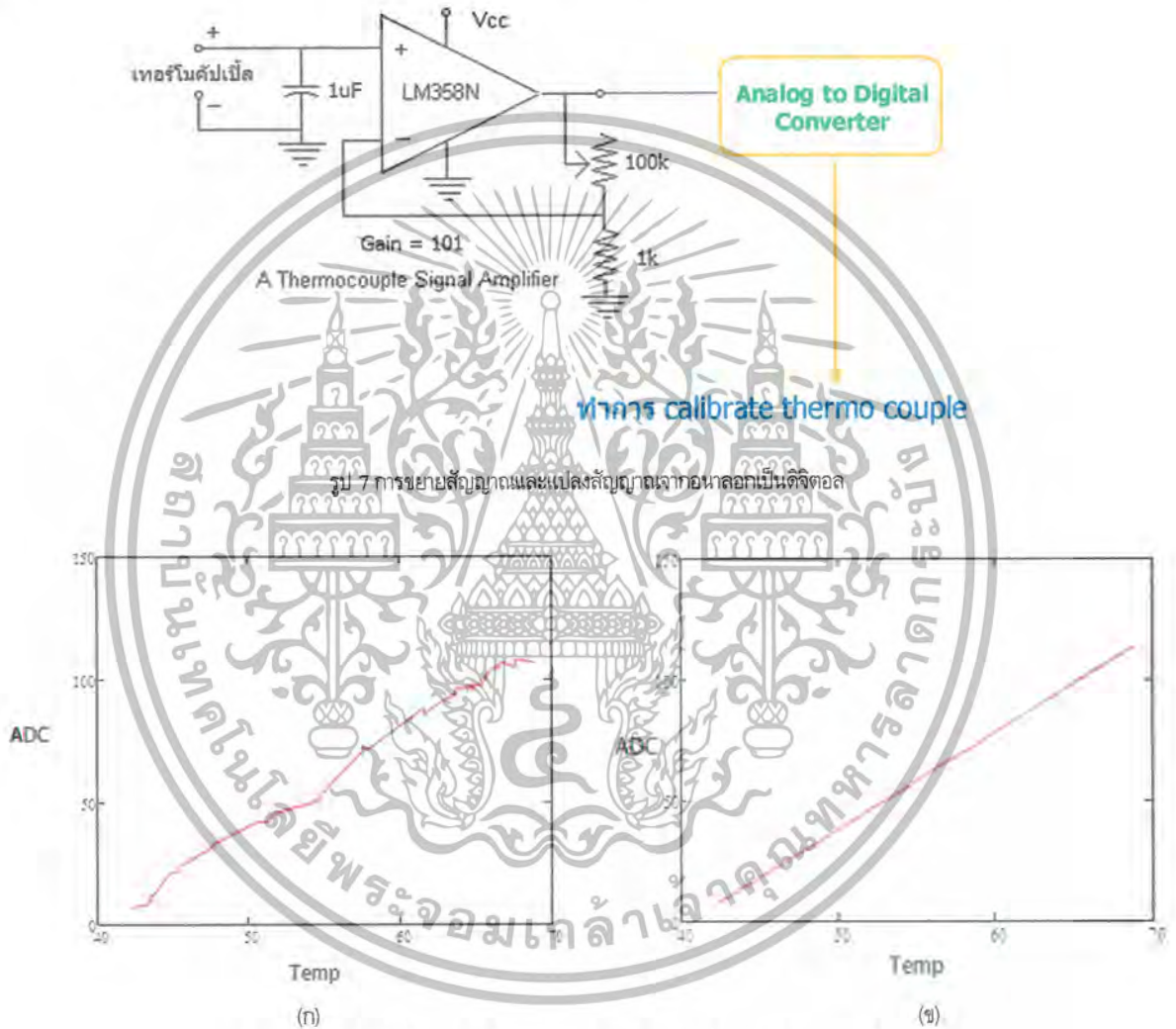
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 6 วงจรนับเวลาจะนำค่าที่นับได้จากวงจรนับสัญญาณทุกๆ 0.5 วินาที เพื่อนำมาคำนวณเป็นความเร็วรอบตามสมการดังนี้

$$RPM = \frac{n \times 2 \times 60}{180} \quad (5)$$

3.5 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้คือเทอร์โมคัปเปิล จากรูป 7 เป็นการขยายสัญญาณของเทอร์โมคัปเปิล โดยใช้ออปแอมป์ที่มีกำลังขยาย 101 เท่า จากนั้นทำการแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยทำการเปรียบเทียบค่า (calibration) ที่ได้จากออปแอมป์กับอุณหภูมิที่ทราบค่า หากความสัมพันธ์ได้ดังรูป 8



รูป 8 กราฟความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการขยายสัญญาณเทอร์โมคัปเปิลและอุณหภูมิที่ทราบค่า
 (ก) กราฟของข้อมูลที่วัดได้จริง
 (ข) กราฟที่ทำการปรับแก้

จากรูป 8 (ก) คือค่าที่ได้จริงจากการเปรียบเทียบค่า และรูป 8 (ข) เป็นค่าที่ได้จากการปรับแก้โดยใช้โปรแกรม MathCad มีสมการเป็น

$$f(Temp) = (4.008 \times Temp) - 162.113 \quad (6)$$

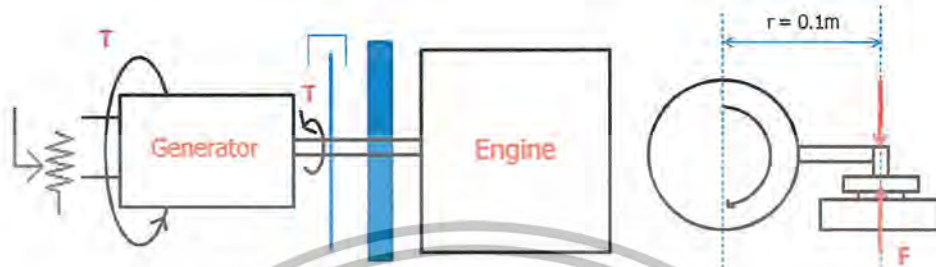
3.6 เครื่องวัดแรงบิด (Torque meter)

การเปลี่ยนแปลงภาระของเครื่องยนต์ (T) โดยใช้การหน่วงจากสนามแม่เหล็กของเจนเนอเรเตอร์ ทำได้ด้วยวงจรดังรูป 9 โดยต่อกับเจนเนอเรเตอร์
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 เติร์กับตัวต้านทานปรับค่าได้ จะเป็นผลให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในเจนเนอเรเตอร์ ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนภาระที่กระทำกับเครื่องยนต์ได้
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเกิดโมเมนต์ต้านการหมุนที่เจนเนอเรเตอร์ สามารถหาค่าโมเมนต์ได้โดยการต่อแขนที่เจนเนอเรเตอร์ ดังรูป 9 แล้วให้กดลงบนตาชั่งคู่กับความยาวแขนจะได้แรงบิดของเครื่องยนต์ ดังสมการ

$$T = F_T \times r_T$$

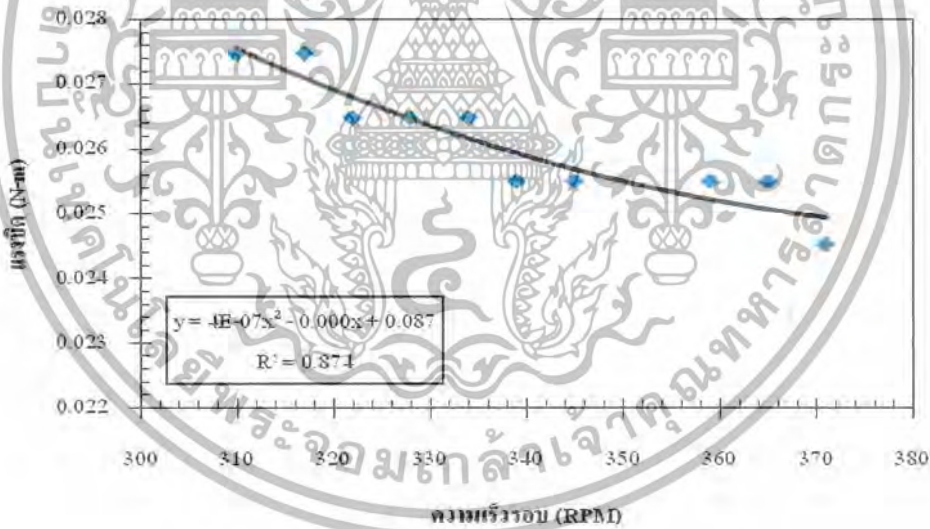
(7)



รูป 9 การทำงานของเครื่องวัดแรงบิด

4. การทดลอง

4.1 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้กระบอกลูกสูบดีเซลเซอร์ซันด์ไม่มีครีบบภายใน



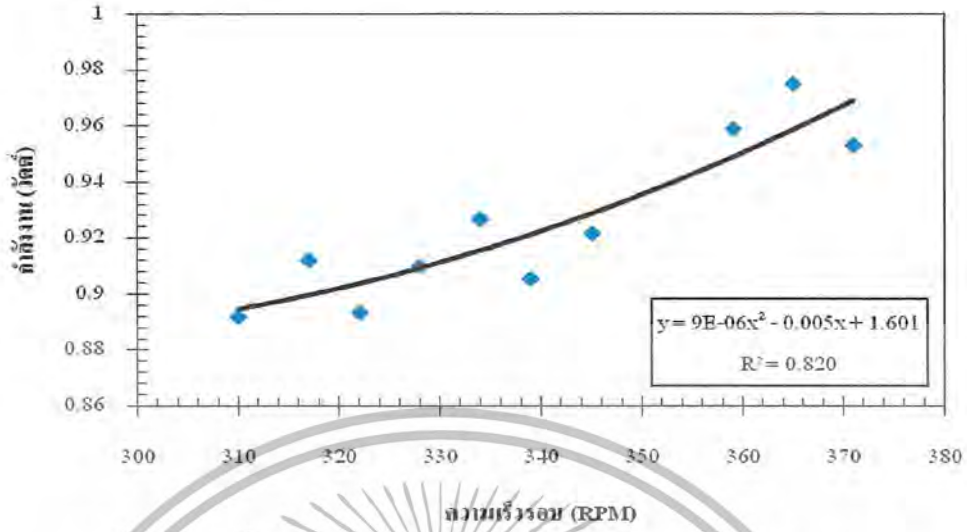
รูป 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอกลูกสูบดีเซลเซอร์ซันด์ไม่มีครีบบ

การทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง มีการให้กำลังงานที่คงที่ การเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ จะทำให้เครื่องยนต์ทำงานช้าลงจนกระทั่งทำให้เครื่องยนต์หยุดทำงาน ซึ่งกล่าวได้ว่าเมื่อแรงบิดลดลง ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

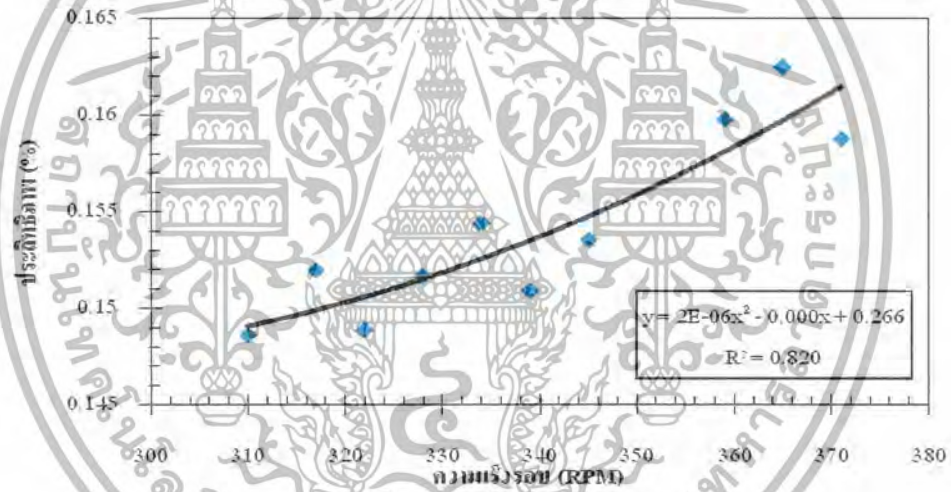
จากรูป 10 พบว่าแรงบิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแคบ ๆ สาเหตุมาจากปัญหาการรั่วซึมของสารทำงานในระบบที่ถูกสูบกำลัง เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่รอบต่ำหรือแรงบิดสูง จะทำให้อากาศในระบบรั่วออก จนกระทั่งเมื่อลดแรงบิดลงทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้รอบสูงขึ้นการรั่วซึมของอากาศจึงลดลง รวมถึงกระบอกลูกสูบชนิดไม่มีครีบบภายในมีพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกำลังงานที่ได้จึงค่อนข้างต่ำ

จากรูป 11 พบว่ากราฟมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการที่มีภาระงานมากทำให้เกิดการรั่วซึมของแก๊สได้มาก แต่กราฟก็ยังไม่ถึงจุดสูงสุด เนื่องจากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนยังไม่สูงพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังงานของขดลวดความร้อนและกรการใช้งานที่ต้องป้องกันความเสียหายของขดลวดความร้อนจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร ความร้อนที่สูงเกินไป ประกอบกับชุดดีเซลเซอร์ซันด์ที่ทดลองเป็นชนิดไม่มีครีบบภายในทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่ดีพอ ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

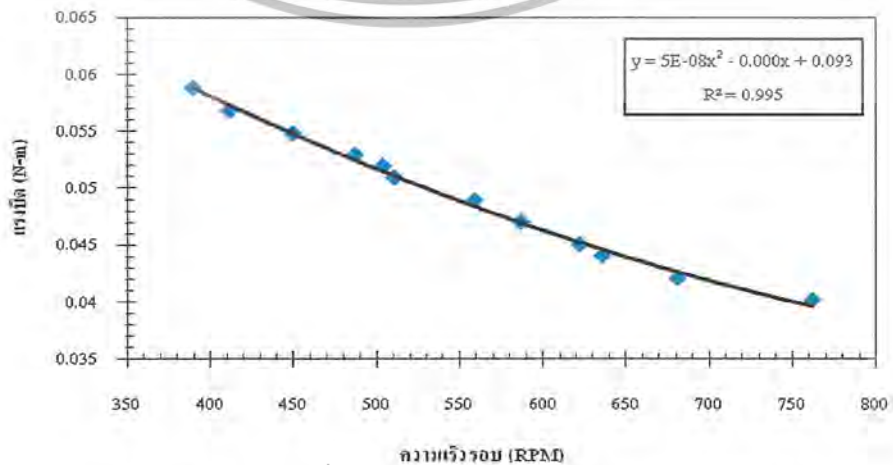
เมื่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ได้จากกำลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์หารด้วยกำลังงานที่คงที่ให้กับเครื่องยนต์ ดังนั้น ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องยนต์จึงมีแนวโน้มเดียวกันกับกราฟของกำลังงาน ดังรูป 12



รูป 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอกลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์ชนิดไม่มีศรีบ



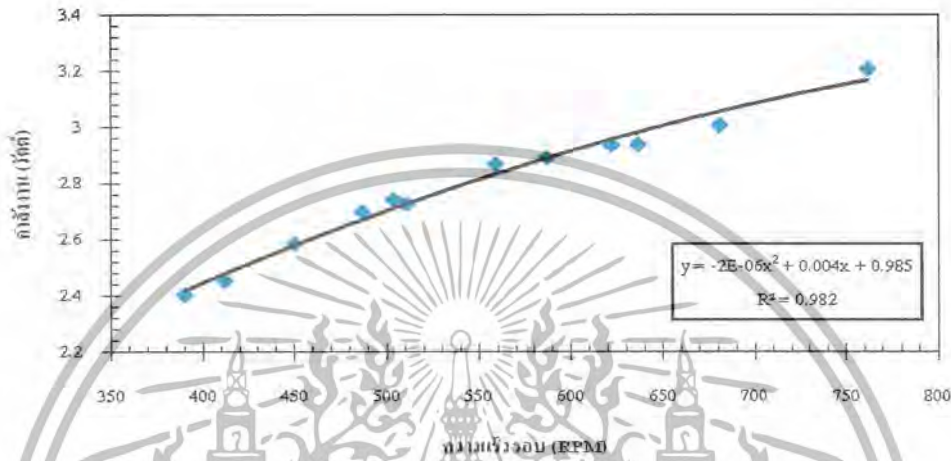
รูป 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอกลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์ชนิดไม่มีศรีบ



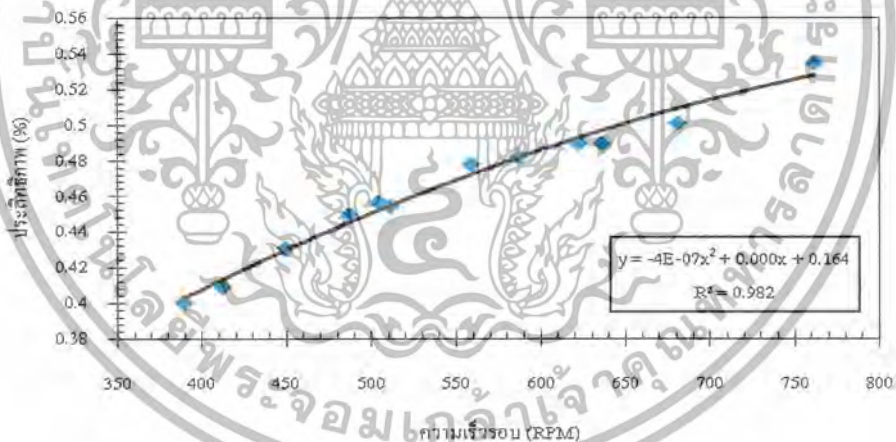
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูป 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบเมื่อใช้กระบอกลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์ชนิดมีศรีบ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบภายใน

จากรูป 13 เป็นผลจากการทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์ ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับกล่าวในหัวข้อ 4.1 ผลของการทำครีบภายในกระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น ส่งผลให้เครื่องยนต์มีแรงบิดเพิ่มขึ้นและมีรอบการทำงานที่สูงขึ้นเช่นกัน จากรูป 14 เห็นได้ว่ากำลังงานของเครื่องยนต์ ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ สัมพันธ์กับความเร็วยรอบ แต่ยังไม่ถึงจุดสูงสุด เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีครีบ การเพิ่มกำลังงานให้กับเครื่องยนต์จะทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานจนถึงจุดสูงสุดได้ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ดังรูป 15 มีแนวโน้มตามกราฟของกำลังงานดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.1



รูป 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและความเร็วยรอบเมื่อใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบ



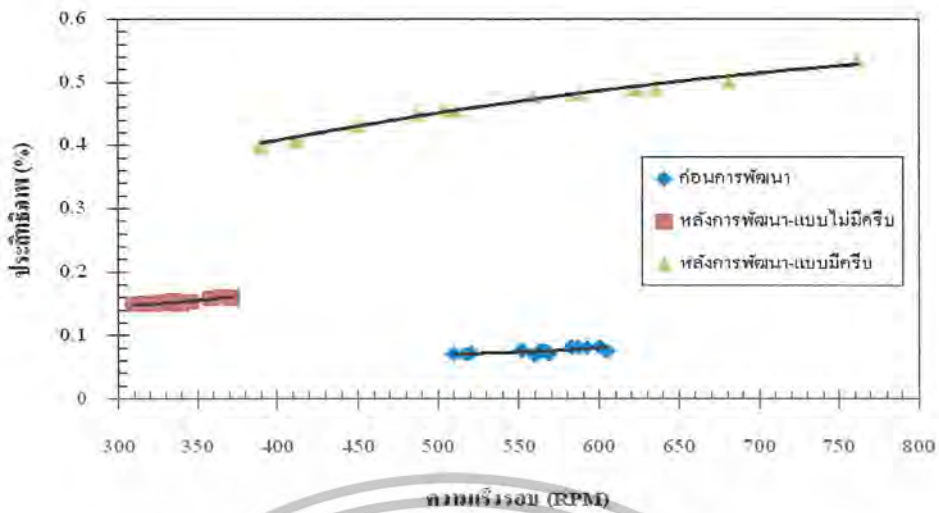
รูป 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วยรอบเมื่อใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีบ

4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์

4.3.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องยนต์ก่อนและหลังการพัฒนา

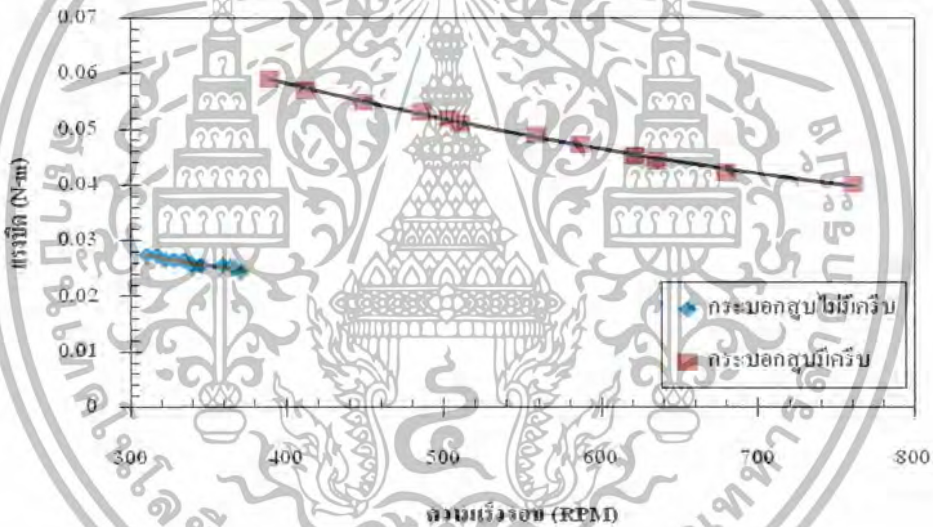
จากรูป 16 ข้อมูลที่นำมาจากโครงการเดิม [3] เป็นการทดสอบผลของอัตราส่วนปริมาตรเปล่าประโยชน์ต่อกำลังงานของเครื่องยนต์ เห็นได้ว่ามีค่าต่ำกว่า 0.1 % แม้ว่าแหล่งความร้อนที่ใช้เป็นขดลวดความร้อนที่ใช้กระแสไฟ 10 แอมป์ แรงดัน 220 โวลต์ ติดตั้งอยู่ภายในกระบอกลูกสูบมีการถ่ายเทความร้อนได้โดยตรง แต่จากการออกแบบดิสเพลสเซอร์ที่ไม่เหมาะสม นั่นคือ ปริมาตรกวาดของดิสเพลสเซอร์มีค่าใกล้เคียงกับลูกสูบกำลัง เมื่อมวลอากาศที่

ส่วนขยายตัวมีน้อย การขยายตัวของแก๊สจึงต้องใช้พลังงานความร้อนมาก เพื่อให้มีแรงดันเพียงพอที่จะดันลูกสูบกำลังให้เกิดงานออกมาที่เพลาคือเหวี่ยง, เอกสักรุ่นเป็นเอกสักรุ่นสูงวุ่นวุ่นส่วนหรือภาวการณ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เมื่อเทียบจากกำลังงานที่ให้กับเครื่องยนต์ที่สูงมาก ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ต่ำมาก ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 16 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก่อนและหลังการพัฒนา

4.3.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะที่ได้จากการใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีครีปและมีครีปภายใน



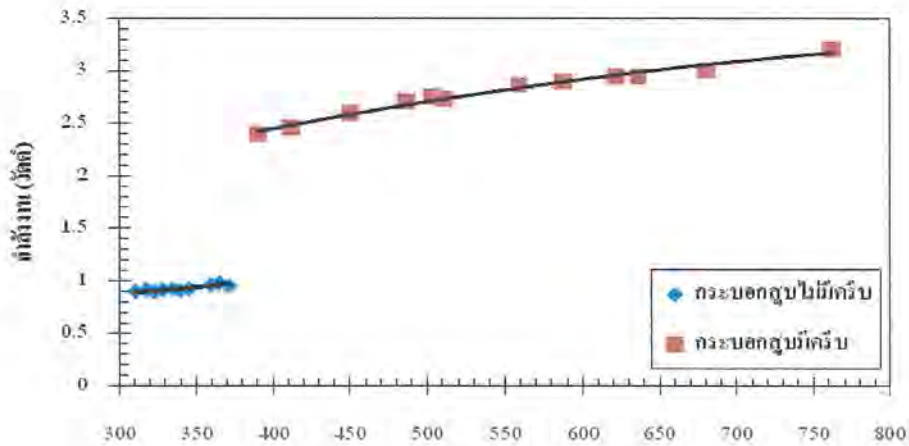
รูป 17 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้กระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีปและไม่มีครีป

จากรูป 17-19 เห็นได้ว่ากระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีครีปมีสมรรถนะสูงกว่าชนิดไม่มีครีป เนื่องจากมีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนภายในมากขึ้น กำลังงานที่ได้จึงเพิ่มขึ้น แม้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้กระบอกลูกสูบชนิดมีครีปจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ก็ถือว่ามีค่าที่ต่ำมาก

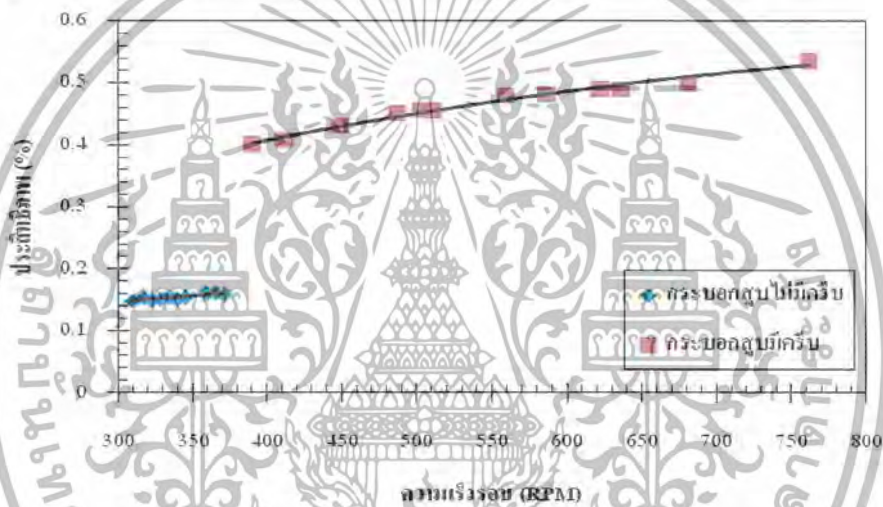
4.4 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ติดตั้งวาล์ว

จากสมมติฐานที่ตั้งขึ้นว่า การระบายความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้อากาศเป็นสารทำงานน่าจะใช้การระบายอากาศร้อนออกจากระบบในจังหวะการขยายตัวของสารทำงาน และดูดอากาศเย็นเข้ามาแทนในจังหวะการอัดตัว คล้ายกับหลักการ การดูดและคายไอเสียในเครื่องยนต์สี่ตาภายในแบบลูกสูบ จึงได้นำสมมติฐานนี้ทำการทดลองติดตั้งวาล์วเปิด-ปิด ซึ่งควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานร่วมกับระบบการวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และสามารถระบุตำแหน่งมุมการหมุนของลูกสูบได้เพื่อใช้เปิด-ปิดวาล์ว ในจังหวะการขยายและอัดตัวตามลำดับ

ผลจากการใช้วาล์วเปิด-ปิด พบว่า ในจังหวะการอัดตัวซึ่งเป็นการดูดอากาศเย็นเข้าสู่ระบบ เมื่อลูกสูบกำลังเริ่มเคลื่อนที่ไปยังจุดศูนย์ตายบน อากาศเย็นที่มีความหนาแน่นสูงได้รั่วออกที่ระยะเพื่อของผนังกระบอกลูกสูบและลูกสูบกำลัง จึงเป็นการสูญเสียกำลังงานโดยเปล่าประโยชน์และไม่มีการนำพลังงานที่สูญเสียไปเป็นเชื้อเพลิงหรือใช้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาดังกล่าวเหมือนที่คาดหวังไว้ ซึ่งประเด็นนี้จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเครื่องยนต์ที่ติดตั้งวาล์ว เครื่องยนต์จึงหยุดทำงานไม่ช้าเกินไป ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 18 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานของเครื่องยนต์ดีเซลเทอร์ซิ่งที่ใช้กระบอกสูบดีเซลเทอร์ซิ่งชนิดมีเทอร์โบและไม่มีเทอร์โบ



รูป 19 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดีเซลเทอร์ซิ่งที่ใช้กระบอกสูบดีเซลเทอร์ซิ่งชนิดมีเทอร์โบและไม่มีเทอร์โบ

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 ผลจากการใช้กระบอกสูบดีเซลเทอร์ซิ่งชนิดไม่มีเทอร์โบภายใน

จากรูป 10-13 เมื่อพิจารณาจุดข้อมูลบนกราฟ เครื่องยนต์ที่ กำลังงานในช่วงที่แคบ คือ ระหว่าง 0.8-1.0 วัตต์ มีรอบการทำงานในช่วง 300-371 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นช่วงที่แคบ และกำลังงานที่ได้ยังไม่ถึงจุดสูงสุด ซึ่งเกี่ยวข้องกับผิวภายในของกระบอกสูบเป็นผิวเรียบทำให้การถ่ายเทความร้อนจากผิวภายในสู่แก๊สในระบบได้จำกัด ดังนั้น กำลังงานที่ให้กับเครื่องยนต์ยังไม่สูงพอที่จะทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้เต็มที่ การที่จะเพิ่มกำลังงานของเครื่องยนต์จึงต้องให้พลังงานความร้อนที่มากขึ้น

กำลังงานที่ได้จากการใช้กระบอกสูบดีเซลเทอร์ซิ่งชนิดไม่มีเทอร์โบเฉลี่ย 0.93 วัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพ 0.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก จากวัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ รูป 1 ในกระบวนการ 4-1 มีการถ่ายเทความร้อนจากสารทำงานให้รีเจนเนอเรเตอร์ก่อนที่สารทำงานจะคายความร้อนออกนอกระบบ และกระบวนการ 2-3 มีการถ่ายเทความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ให้สารทำงานก่อนที่จะรับความร้อนจากภายนอก ซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทกลับไปที่แก๊สเป็นการลดการสูญเสียความร้อนและการรับความร้อนจากภายนอก รวมถึงเป็นการเพิ่มงานของระบบ เมื่ออัตราการรับ (3-4) และคายความร้อน (1-2) ของระบบคงที่ ดังนั้น เหตุผลที่ทำให้เครื่องยนต์ที่พัฒนาประสิทธิภาพต่ำ มาจากการที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ สารทำงานที่ร้อนจึงคายความร้อนออกนอกระบบโดยตรงและต้องใช้เวลามากขึ้นในการรับและคายความร้อน ซึ่งเป็นการจำกัดกำลังงานและรอบการทำงานของเครื่องยนต์เช่นกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาการรั่วซึมของแก๊สในระบบทำให้เครื่องยนต์รับภาระงานสูงไม่ได้ ซึ่งจะทำให้แก๊สรั่วออกในจังหวะขยายตัวและต้องดูดอากาศภายนอกเข้ามาแทนที่อีกครั้งในจังหวะอัดตัว จึงเป็นการสูญเสียกำลังงานโดยเปล่าประโยชน์ แม้ว่าเครื่องยนต์ที่ใช้กระบอกสูบชนิดไม่มีคิรียจะทำงานได้ในช่วงแคบ แต่ก็ไม่สามารถทำงานที่รอบต่ำกว่า 300 รอบต่อนาที ได้เนื่องจากผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนและการรั่วซึม ทำให้เครื่องยนต์เริ่มทำงานเมื่อมีอุณหภูมิที่สูงพอสมควรประมาณ 300 องศาเซลเซียส ขึ้นไปหากต้องการลดอุณหภูมิที่เครื่องยนต์เริ่มทำงาน ต้องออกแบบให้ปริมาตรกวาดของดิสเพลสเซอร์ใหญ่มากเมื่อเทียบกับปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.1.2

5.2 ผลจากการใช้กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีคิรียภายใน

เมื่อขนาดกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์มีขนาดเท่ากัน แต่เมื่อทำการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในสามารถทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นดังรูป 17-19 เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนแบบการพาเป็นฟังก์ชันกับพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้กำลังงานที่ได้จากการใช้กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดมีคิรียสูงขึ้นในช่วง 2.4-3.2 วัตต์ และช่วงการทำงานที่กว้างขึ้น 390-760 รอบต่อนาที ได้กำลังงานเฉลี่ย 2.94 วัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพเฉลี่ย 0.46 % เหตุผลที่ทำให้ประสิทธิภาพต่ำเช่นเดียวกับที่กล่าวในข้อ 5.1 รวมถึงปัญหาการรั่วซึมเช่นกัน

5.3 ผลจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องยนต์ก่อนและหลังการพัฒนา

จากรูป 16 แสดงให้เห็นว่า การพัฒนาเฉพาะการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากเป็นสิ่งสำคัญที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง จากอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนั้น กระบอกสูบชนิดไม่มีคิรียภายในสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ได้ประมาณ 50.43 เปอร์เซ็นต์ และชนิดมีคิรียภายในเพิ่มประสิทธิภาพได้ 83.58 เปอร์เซ็นต์ แม้จะเป็นตัวเลขที่มาก แต่ประสิทธิภาพที่ได้หลังการพัฒนา ยังไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์

5.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะที่ได้จากการใช้กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ชนิดไม่มีคิรียและมีคิรียภายใน

จากรูป 17-19 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้เฉลี่ย 66.83 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าขนาดภายในกระบอกสูบจะเท่ากัน แต่เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในระบบอาศัยหลักการพาความร้อน ดังนั้น การเพิ่มพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนจึงทำให้กำลังงานที่ได้เพิ่มขึ้น

5.5 ผลของการติดตั้งวาล์ว

ผลของการติดตั้งวาล์วเพื่อถ่ายเทอากาศร้อนออกจากระบบช่วยการระบายความร้อน ผลปรากฏว่า ในจังหวะอัดตัวเครื่องยนต์จะดูดอากาศเย็นจากภายนอกเข้ามา ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นแต่เนื่องจากการรั่วซึมที่ลูกสูบกำลังทำให้อากาศที่ถูกอัดรั่วออก เครื่องยนต์จึงสูญเสียกำลังและหยุดทำงาน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kongtragool B, Wongwises S., A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. *Renew Sust Energy Rev* 2003; 7:131-54.
- [2] เสริม จันทร์ฉาย, รศ.ดร. และคณะ, “ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระบบความร้อนแบบรวมแสงในประเทศไทย”, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ร่วมกับ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ, ค.ศ. 2006.
- [3] จำริญ ศรีจันทร์ และ มานพ เหลืองทองวัฒนา, “การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องยนต์สเตอร์ลิง”, ปรินูญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.
- [4] G. Walker, *STIRLING ENGINE*, Oxford University Press, New York, 1980.
- [5] Kongtragool B, Wongwises S, Investigation on power output of the gamma-configuration low temperature differential Stirling engines., *Renew Energy* 2005; 30:465-476.
- [6] Kongtragool B, Wongwises S, Thermodynamic analysis of a Stirling engine includeing dead volumes of hot space, cold space and regenerator., *Renew Energy* 2006; 31:345-359.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้