การศึกษาและการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า
STUDY AND DEVELOP OF STIRLING ENGINE BETA TYPE

วริษฐ์ เซนย์วิบูลย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาและการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า

STUDY AND DEVELOP OF STIRLING ENGINE BETA TYPE

วริษฐ์ เชนย์วิบูลย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY AND DEVELOP OF STIRLING ENGINE BETA TYPE

VARIT SENVIBOON

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHATRONICS ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า

STUDY AND DEVELOPS OF STIRLING ENGINE BETA TYPE

ผู้จัดทำ นายวริษฐ์ เชนย์วิบูลย์ 54011152

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุมิตร พนาอุดมทรัพย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า

โดย
นายวริษฐ์ เซนย์วิบูลย์ 54011152

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุมิตร พนาอุดมทรัพย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ ในการออกแบบเครื่องยนต์ที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ และได้ทำการทดลองสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบชนิดเบต้าขนาดเล็กขึ้นมา เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆในการผลิตและตัวแปรในการออกแบบเพื่อใช้งานจริง ซึ่งจากการทดลองสร้างทำให้รู้ว่าตัวแปรในทางปฏิบัตินั้นมีจำนวนที่มากกว่าและซับซ้อนกว่าตัวแปรในทางทฤษฎีเป็นอย่างมาก การวิเคราะห์วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์จะใช้วิธีวิเคราะห์แบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Analysis) ตามหลักแก๊สในอุดมคติและการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรในเวลาใดๆด้วยสมการการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ซึ่งจะทำให้ได้พีวีไดอแกรมวัฏจักรสเตอร์ลิงที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ในการทดลองแหล่งพลังงานความร้อนของเครื่องยนต์จะใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา และควบคุมอุณหภูมิและใช้น้ำในการระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY AND DEVELOP OF STIRLING ENGINE BETA TYPE

By

Mr. Varit Senviboon 54011152

Advisors

Asst.Prof.Dr. Sutapat Kwankaomeng

Asst.Prof. Sumit Panaudomsub

Academic Year 2014

ABSTRACT

This thesis has the objective to study different variables of the stirling engine design which influence the engine operation. For this, we built a small prototype engine (beta type) to study variables of the design compare to machine building for realistic use. We found out that there are much more variables and complications in production vs. the design theory.

In this analysis of stirling cycle, we use an isothermal method follow an ideal gas law and changing volume on time. We use a mechanism equation which makes a P-V diagram of stirling cycle more realistic. Also, to make it easy, we use electric heater as a source for heat and use water as a cooler.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะคำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือและการสนับสนุนในทุกๆ ด้านจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง และผู้ช่วยศาสตราจารย์สุมิตร พนาอุดมทรัพย์

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์บรรเทิง ศิลป์สกุลสุข จากมหาวิทยาลัยสยาม ที่ช่วยให้คำแนะนำดีๆ แนวคิดต่างๆ และความเอาใจใส่คอยติดตามงานมาโดยตลอดจนทำให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ และขอบคุณพี่ๆ ปริญญาโทพี่อุ้ม (พงษ์นรินทร์ สว่างวงศ์) และพี่ฟิก (สุริยา จินเดหวา) ที่คอยช่วยเหลือทำให้งานดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุมิตร พนาอุดมทรัพย์ และคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่คอยสั่งสอนให้ความรู้ และอนุญาตให้ทำโปรเจคร่วมกับภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ที่ช่วยเหลือและให้การสนับสนุนด้านทุนทรัพย์ ซึ่งข้าพเจ้าขอระลึกบุญคุณ และขอกราบขอบพระคุณทุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้จัดทำ
นายวริษฐ์ เชนย์วิบูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	**4**
2.1 ประวัติความเป็นมา	4
2.2 การจัดรูปแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	5
2.2.1 ชนิดการออกแบบต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสองทาง	5
2.2.2 ชนิดและการออกแบบต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานทางเดียว	6
2.2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบอิสระ	10
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	11
2.3.1 กฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์	11
2.3.2 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์	11
2.3.3 เครื่องยนต์ความร้อน	11
2.3.4 เครื่องทำความเย็นและฮีตปั๊ม	11
2.3.5 ระบบ	12
2.3.6 วัฏจักร	12
2.3.7 วัฏจักรความร้อนในอุดมคติ	13
2.3.8 วัฏจักรสเตอร์ลิง	14
2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อใช้เป็นเครื่องทำความเย็น	17
2.5 ข้อแตกต่างของวัฏจักรสเตอร์ลิงใช้งานจริงกับในอุดมคติ	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 หลักในการคำนวณและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	20
2.6.1 การคาดประมาณกำลังงานที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตได้	20
2.6.2 ประสิทธิภาพทางความร้อน	21
2.6.3 ตัวแปรสำคัญในการออกแบบ	21
บทที่ 3 การออกแบบขนาดและชิ้นส่วนประกอบเครื่องยนต์	**25**
3.1 ขนาดและขีดจำกัดของเครื่องยนต์	25
3.2 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์	26
บทที่ 4 การวิเคราะห์วัฏจักรเครื่องยนต์	**30**
4.1 การคำนวณการเคลื่อนที่ของกลไกลูกสูบ	30
4.2 การคำนวณตำแหน่งและปริมาตรภายในกระบอกสูบ	31
4.3 สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ	33
4.4 การวิเคราะห์แบบอุณหภูมิคงที่	33
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	**37**
5.1 การทดสอบเครื่องยนต์	37
5.2 อุปกรณ์ที่ในการทดลอง	37
5.3 ขั้นตอนการทดสอบ	40
5.4 ผลการทดสอบ	41
5.5 สรุปผลการทดลอง	42
บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	**43**
6.1 สรุป	43
6.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	**44**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	45
ภาคผนวก ก.	46
ภาคผนวก ข.	55
ภาคผนวก ค.	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภาพแสดงแผนการดำเนินงาน	2
2.1 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสองทาง	6
2.2 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 3 แบบพื้นฐาน	7
2.3 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมม่า	8
2.4 กลไกเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบรอมบิค	8
2.5 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมม่า	9
2.6 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟ่า	10
2.7 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิด Free Piston	10
2.8 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของวัฏจักรความร้อน	12
2.9 วัฏจักรคาร์โน	13
2.10 วัฏจักรคาร์โนและวัฏจักรสเตอร์ลิง	14
2.11 วัฏจักรสเตอร์ลิง	15
2.12 P-V ไดอาแกรมเมื่อเป็นฮีตปั๊ม	17
2.13 กระบวนการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อเป็นฮีตปั๊ม	18
2.14 P-V และ T-S ไดอาแกรมของเครื่องยนต์และฮีตปั๊ม	18
2.15 วัฏจักรสเตอร์ลิงแบบของจริง	19
2.16 กราฟบีลนัมเบอร์	20
3.1 เครื่องยนต์ในโปรแกรม CAD	27
3.2 ฝาสูบ	27
3.3 กระบอกสูบ	28
3.4 เพลาข้อเหวี่ยง	28
3.5 ลูกสูบกำลัง	28
3.6 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์	29
3.6 ก้านสูบของลูกสูบกำลังและลูกสูบดิสเพลสเซอร์	29
3.7 ล้อช่วยแรง	29
4.1 แผนภาพแสดงตัวแปรของกลไก Slider Crank	30
4.2 แผนภาพชิ้นส่วนกลไกภายในเครื่องยนต์	31
4.3 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของลูกสูบ	32

เอกสารนี้มีไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงค่าปริมาตรของห้องอัดห้องขยาย	33
4.5 กราฟความดันภายในเครื่องยนต์ต่อมุมของข้อเหวี่ยงที่หมุนไป	35
4.6 P-V Diagram เครื่องยนต์	35
5.1 เครื่องวัดความเร็วรอบ	38
5.2 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด	38
5.3 มัลติมิเตอร์ต่อสายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล	38
5.4 เครื่องจับเวลา	39
5.5 ฮีตเตอร์	39
5.6 ที่จับหลอดทดลอง	39
5.7 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง	40
5.8 รูปแสดงการเตรียมการทดลอง	40
5.9 กราฟอุณหภูมิความเร็วรอบต่อเวลา	41
5.10 กราฟความเร็วรอบต่ออุณหภูมิด้านเย็น	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางค่าขนาดของเครื่องยนต์	25
3.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ออกแบบ	26
4.1 ตารางแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณวัฏจักรของเครื่องยนต์	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน

ในปัจจุบันแหล่งพลังงานของมนุษย์ส่วนใหญ่จะเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป และทรัพยากรเหล่านี้ในปัจจุบันเริ่มเหลือไม่มาก จึงจำเป็นต้องเสาะหาแหล่งพลังงานที่นำกลับมาใช้ได้เรื่อยๆ ดังนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงถูกนำขึ้นมาใช้อีกครั้ง เพราะเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้แหล่งพลังงานความร้อนอะไรก็ได้ที่สามารถทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงก็จะสามารถทำงานได้ และความก้าวหน้าทางความรู้และเทคโนโลยีทางด้านโลหะที่มากขึ้น สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะให้มีความแข็งแรงและทนทานต่อความร้อนได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นมีกำลังที่สูงขึ้น ประกอบกับความก้าวหน้าทางความรู้ด้านเทอร์โมไดนามิกส์ ที่สามารถวิเคราะห์ได้ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น สามารถทำให้ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้นได้อีก ซึ่งคาดว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นจะถูกนำมาเพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือกในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อการศึกษาการทำงาน ตัวแปรในการออกแบบเครื่องยนต์ความร้อนสเตอร์ลิง
2. เพื่อทดลองสร้างเครื่องยนต์ความร้อนสเตอร์ลิงให้สามารถทำงานได้
3. เพื่อทดสอบการทำงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์
4. เพื่อเรียนรู้วิธีการออกแบบเครื่องจักรกล

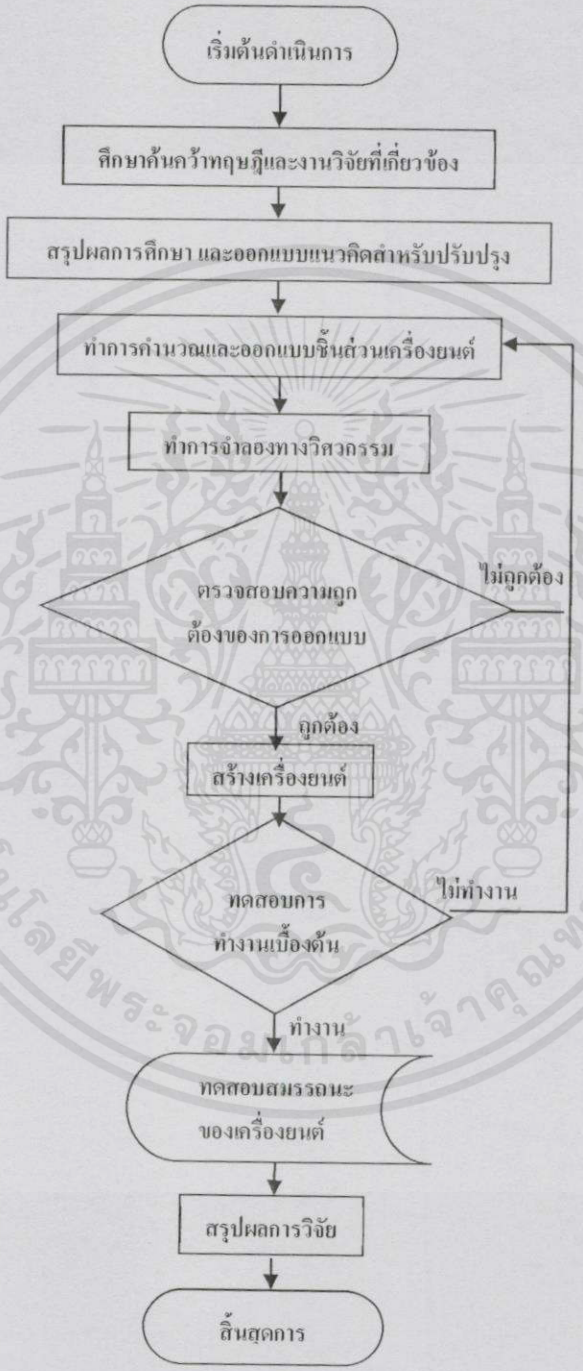
1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. ทำการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
2. ใช้อากาศเป็นแก๊สในการทำงานภายในเครื่องยนต์
3. เครื่องยนต์ทำงานภายใต้ความดันบรรยากาศ
4. การวิเคราะห์จะใช้วิธีของ ชมิทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานเป็นไปตามรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงแผนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

1. เข้าใจระบบการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
2. สามารถวิเคราะห์ และออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้
3. ได้รู้วิธีผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล
4. สามารถนำความรู้ที่เรียนมาประยุกต์ใช้กับการทำงานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ประวัติความเป็นมาของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

คำจำกัดความสั้นๆ สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือ เครื่องยนต์ที่มีวัฏจักรการทำงานแบบระบบปิดรีเจนเนอร์เรทีพ วัฏจักรประกอบไปด้วยกระบวนการอัดตัว และขยายตัวของของไหลที่อุณห ๓มิต่างกัน การเปลี่ยนแปลงขนาดปริมาตรของระบบจะเป็นตัวควบคุมของไหล และจะมีการแปรสภาพจากพลังงานความร้อนเป็นกำลังงานหรือในทางกลับกัน

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีชื่อเรียกหลายแบบด้วยกัน เช่น เครื่องยนต์อากาศร้อน, เครื่องยนต์แก๊สร้อน หรืออาจจะตั้งตามชื่อบุคคลที่คิดค้นแบบต่างๆ แต่ชื่อเครื่องยนต์แก๊สร้อนของฟิลลิปส์นั้นจะใช้ในการสื่อความหมายแบบเดียวกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมากกว่าชื่อในแบบอื่นๆ เพราะห้องปฏิบัติการของฟิลลิปส์มีความสำคัญมากในการปรับปรุงเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ให้สามารถนำมาแข่งกับเครื่องยนต์ร้อนชนิดอื่นๆ เช่น ดีเซล, เบนซิล

ในปี ค.ศ. 1816 โรเบิร์ตสเตอร์ลิง เป็นบุคคลแรกที่ได้ประดิษฐ์เครื่องยนต์แบบระบบปิดรีเจนเนอร์เรทีพขึ้น แต่ในการคิดค้นของเขาไม่ประสบผลสำเร็จมากนักในด้านกำลังงานที่ผลิตออกมา เขายังได้กล่าวไว้ว่า “ในอนาคตข้างหน้า เมื่อมีความรู้ทางด้านโลหะพัฒนามากขึ้น เครื่องยนต์ความร้อนชนิดนี้จะประสบผลสำเร็จอย่างมากมายไปด้วย”

ช่วงประมาณกลางคริสต์ศักราชที่ 19 เครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น ดีเซล และแก๊สโซลีน พร้อมทั้งมอเตอร์ไฟฟ้าได้ก้าวหน้ามาแทนที่เครื่องจักรไอน้ำ จึงทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีความสนใจตกไป ไม่มีการพัฒนามากนัก แต่ในประมาณปี ค.ศ. 1930 ทางห้องปฏิบัติการค้นคว้าของฟิลลิปส์ประเทศเนเธอร์แลนด์ ได้เริ่มจับงานทางด้านเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอย่างจริงจัง และได้พัฒนารูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอย่างมากมาย เช่น สามารถให้กำลังงานที่ได้ออกมากมายถึงขนาดร้อยๆ แรงม้ามีการคิดค้นกลไกแบบรอมบิค การพัฒนาด้านซีลกันรั่ว ฯลฯ จากความสำเร็จของฟิลลิปส์นั้นทำให้มีประเทศต่างๆ มีความสนใจในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมากขึ้น เช่น เยอรมัน และอเมริกา มีการร่วมมือในการค้นคว้าเกิดขึ้น

ในปี ค.ศ. 1960 วิลเลียม บีล ศาสตราจารย์ของมหาวิทยาลัยโอไฮโออเมริกา ได้คิดค้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสสระขึ้น ซึ่งเป็นอีกแบบหนึ่งของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่น่าสนใจ

ในปัจจุบัน ปัญหาด้านเสียง, อากาศ, และการสงวนพลังงานเป็นที่สนใจมากทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้รับการพัฒนาและคิดค้นมากยิ่งขึ้น เพราะสามารถควบคุมและลดปัญหาต่างๆ จากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ง่ายกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ปัจจุบันถึงแม้จะยังไม่มีการผลิตเครื่องยนต์สเตอร์ลิงออกสู่ตลาด เพราะยังติดขัดปัญหาด้านเทคนิคหลายประการ โดยเฉพาะด้านประสิทธิภาพที่ทำให้ยังมีผู้สนใจพัฒนาอยู่คือ

1. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสร้างได้ง่ายกว่าเครื่องยนต์ดีเซล หรือแก๊สโซลีน เพราะไม่ต้องมีวาล์ว จานจ่าย หัวฉีด และระบบเวลา เนื่องจากเป็นวัฏจักรปิด

2. มีระดับเสียงต่ำมาก เพราะไม่มีการจุดระเบิดในเครื่อง

3. การสันดาปอยู่ภายนอกเครื่อง ทำให้สามารถใช้เชื้อเพลิงใดๆ ก็ได้ แม้กระทั่งแสงอาทิตย์ ไม่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาสูง เช่น แก๊สโซลีน หรือดีเซล

4. การสันดาปอยู่ภายนอกเครื่อง ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ได้ง่าย การควบคุมมลพิษจากการเผาไหม้ก็ทำได้สะดวกขึ้น

5. การทำงานของเครื่องยนต์ตามวัฏจักรปิด ทำให้สามารถเลือกแก๊สทำงานได้หลายชนิด นอกจากอากาศปกติ เช่น ไฮโดรเจน ฮีเลียม อลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นต้น แก๊สที่กล่าวมา ข้างต้นนี้มีค่าคงมี่ของแก๊สสูงกว่าอากาศมาก จึงทำให้กำลังเครื่องผลิตออกมาได้สูงกว่ากำลังที่อากาศผลิตออกมาได้มวลเท่ากัน

6. ถ้าเพิ่มมวลของแก๊สในระบบกำลังจะเพิ่มตาม เนื่องจากเครื่องยนต์ทำวัฏจักรปิด การเพิ่มมวลในระบบจึงทำได้โดยง่าย โดยเพิ่มความดันต่ำสุดในระบบให้สูงกว่าบรรยากาศ

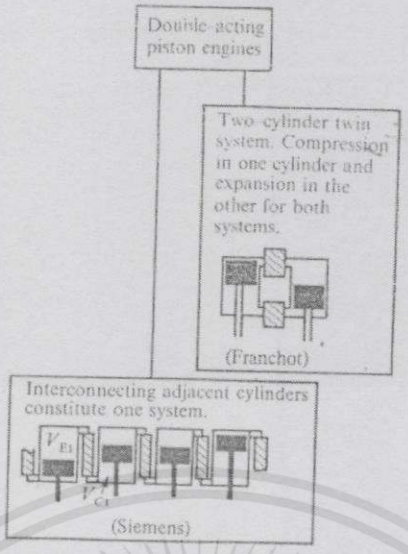
2.2 การจัดรูปแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

รูปแบบของการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถแบ่งเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้สองประเภทด้วยกัน คือ ประเภททำงานทางเดียว (Single Acting) และประเภททำงานสองทาง (Double Acting) ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.1 ชนิดการออกแบบต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสองทาง

มีรูปแบบในการเลือกออกแบบดังแสดงในรูปที่ 2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานสองทางจะประกอบด้วยกระบอกสูบหลายชุดต่อกัน โดยที่บริเวณขยายตัวของกระบอกสูบหนึ่งจะต่อกับตัวแลกเปลี่ยนความร้อน และผ่าไปยังบริเวณอัดตัวของกระบอกสูบที่อยู่ใกล้กัน จะมีจุดเคลื่อนที่เพียงชุดเดียวต่อกระบอกสูบหนึ่งตัว ซึ่งอาจจะเป็นลูกสูบหรือดิสเพลเซอร์จำนวนวัฏจักรทำงานของสเตอร์ลิงจะเท่ากับจำนวนกระบอกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสองทาง

จุดเด่นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานสองทางคือ ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่มีจำนวนเพียงครึ่งเดียวของจำนวนที่ต้องใช้ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานทางเดียว ดังนั้นกลไกในการขับจึงสามารถจัดให้ง่ายและเป็นการลดต้นทุนการผลิตด้วย อีกทั้งเหมาะสมที่จะให้กับเครื่องขนาดใหญ่ที่มีกำลังเกิน 20 แรงม้าขึ้นไป

ข้อเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานสองทางคือ เป็นการจำกัดขอบเขตการยืดหยุ่นในการออกแบบ และขยายช่วงบริเวณภาวะทำงานของเครื่องได้น้อยกว่า

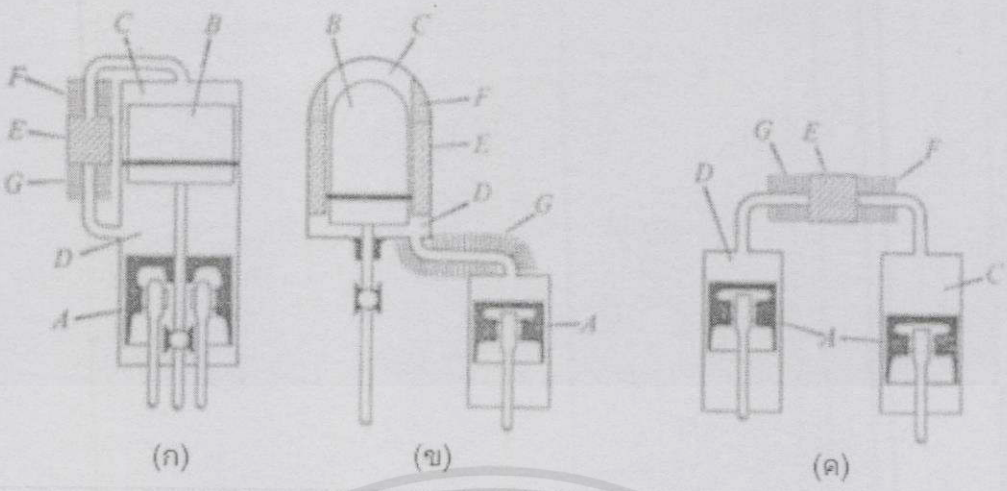
2.2.2 ชนิดและการออกแบบต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานทางเดียว

สามารถแบ่งแยกประเภทกว้างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานทางเดียวออกเป็น 2 ประเภทคือ ชนิดลูกสูบสองตัว (แบบแอลฟ่า) และชนิดลูกสูบกับดิสเพลสเซอร์ (แบบเบต้า แกมม่า และลูกสูบอิสระ) ดังสามารถแสดงรูปแบบในรูปที่ 2.2 ข้อแตกต่างระหว่างลูกสูบและดิสเพสเซอร์คือ ความดันที่ตอนบนและตอนล่างของตัวดิสเพสเซอร์จะมีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน (ซึ่งเกิดการสูญเสียเนื่องจากการไหลของอากาศ) ดังนั้นการซีลของแก๊สไม่มีปัญหามากนักในตัวดิสเพสเซอร์เมื่อเครื่องยนต์ทำงาน ตัวดิสเพสเซอร์จะไม่มีงานออกมาแต่จะทำหน้าที่คล้ายตัวกวาดแก๊สจากที่แห่งหนึ่งสู่อีกแห่งหนึ่ง

ตัวลูกสูบจะมีความดันแตกต่างกันมากระหว่างตอนบนและตอนล่างของลูกสูบดังนั้นมีปัญหาด้านซีลแก๊ส และกำลังที่ได้ของเครื่องก็มาจากลูกสูบนั่นเอง

ในเครื่องยนต์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงบางชนิด ตัวดิสเพสเซอร์จะทำด้วยแผ่นโลหะที่มีรูปแบบเหมือนตัวรีเจนเนอร์เรเตอร์ เพื่อใช้ในการรับแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยลักษณะเช่นนี้จะเรียกว่า "รีเจนเนอร์เรทีฟ ดิสเพสเซอร์"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



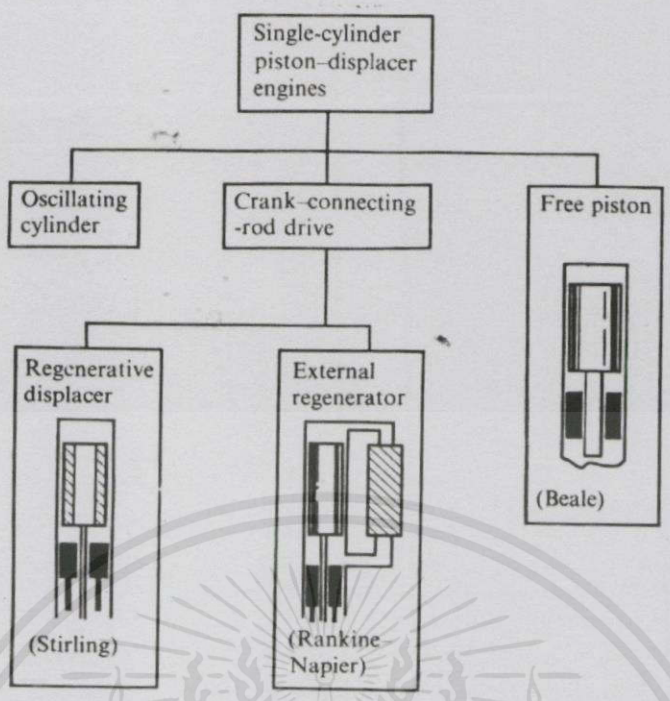
รูปที่ 2.2 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 3 แบบพื้นฐาน
(ก) ลูกสูบกำลัง-ดิสเพลสเซอร์ในกระบอกสูบเดียวกัน
(ข) ลูกสูบกำลัง-ดิสเพลสเซอร์ในกระบอกสูบแยกกัน
(ค) ลูกสูบกำลังสองตัว

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบกระบอกสูบเดียวชนิดลูกสูบกับดิสเพสเซอร์หรือแบบเบต้า

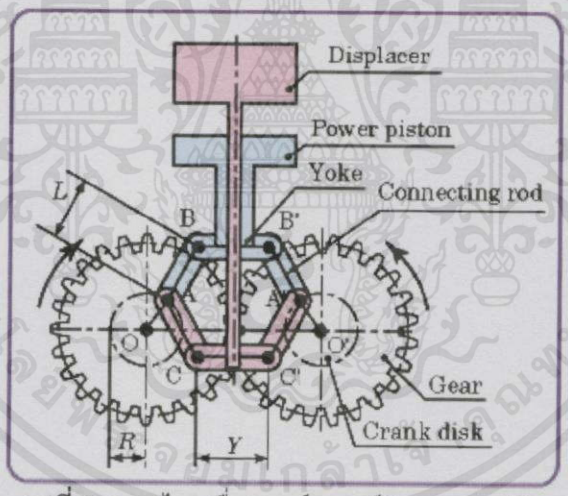
แบบต่างๆ ของเครื่องยนต์ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 เป็นแบบที่ได้รับความนิยมสูงเฉพาะแห่ง แบบโครงสร้างชนิดนี้ถูกสร้างโดย โรเบิร์ต สเตอร์ลิง ในปี ค.ศ. 1816 มีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.3 โครงสร้างชนิดนี้ได้รับความสนใจในการพัฒนาโดยบริษัทฟิลลิปส์

เครื่องยนต์จะขับเคลื่อนโดยข้อเหวี่ยงหรือกลไกชนิดรอมบิกดังรูปที่ 2.4 จะมีรูปลักษณะแบบรีเจนเนอร์เรทีฟดิสเพลสเซอร์ หรืออาจจะแยกชุดรีเจนเนอเรเตอร์ไว้ข้างนอกก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า



รูปที่ 2.4 กลไกเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบรอมบิค

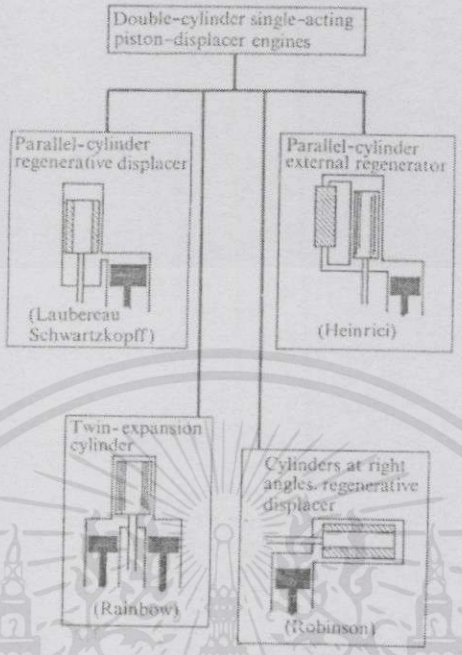
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบกระบอกสูบของชุดต่อหนึ่งวัฏจักรทำงานชนิดลูกสูบดิสเพสเซอร์หรือแบบแกมม่า

รูปแบบเครื่องชนิดนี้ถูกสร้างในปี คศ. 1827 โดย โรเบิร์ต และเจมส์ สเตอร์ลิงและใช้งานหลายปีแต่ในเวลาต่อมาก็ถูกยกเลิก เพราะเกิดความเสียหายที่กระบอกสูบของตัวดิสเพสเซอร์ เนื่องจากเนื้อโลหะในสมัยนั้นคุณภาพไม่ดี จึงเกิดความร้อนที่กระบอกสูบมากเกินไป

ต่อมาได้มีผู้คิดค้นแบบเครื่องยนต์ชนิดนี้ไว้มากมายดังรูปที่ 2.5 แต่แบบที่น่าสนใจมากที่สุดคือแบบของ RAINBOW ซึ่งสร้างใน ปีคศ. 1971 เครื่องยนต์ชนิดนี้ประกอยด้วยลูกสูบสองตัว และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดิสเพสเซอร์หนึ่งชุด ข้อดีคือมีความยืดหยุ่นของกลไกขับเคลื่อน และทำให้ปัญหาด้านซีลและการหล่อเย็น สามารถแก้ไขได้ง่ายขึ้น

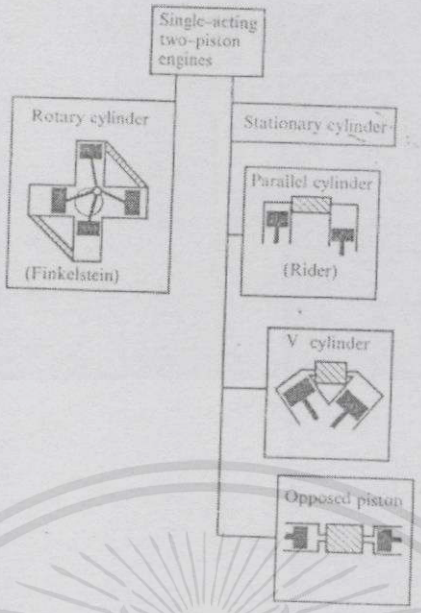


รูปที่ 2.5 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมม่า

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบทำงานทางเดียวชนิดลูกสูบหลายตัวหรือแบบแอลฟ่า

ประเภทของลูกสูบ-กระบอกสูบ เป็นชนิดที่รู้จักมากที่สุด ในรูปที่ 2.6 แสดงชนิดประเภทต่างๆ ของเครื่องยนต์ทำงานทางเดียวแบบหลายสูบหรือแบบแอลฟ่า เครื่องยนต์ประเภทนี้จะประกอบด้วยกระบอกสูบสองกระบอกและลูกสูบกำลังสองกระบอก กระบอกหนึ่งจะเป็นฝั่งร้อนอีกกระบอกหนึ่งจะเป็นฝั่งเย็น เครื่องยนต์ประเภทนี้จึงมีกำลังมากกว่าเครื่องยนต์แบบทำงานทางเดียวชนิดอื่นๆ เพราะได้กำลังจากลูกสูบทั้งสองตัว

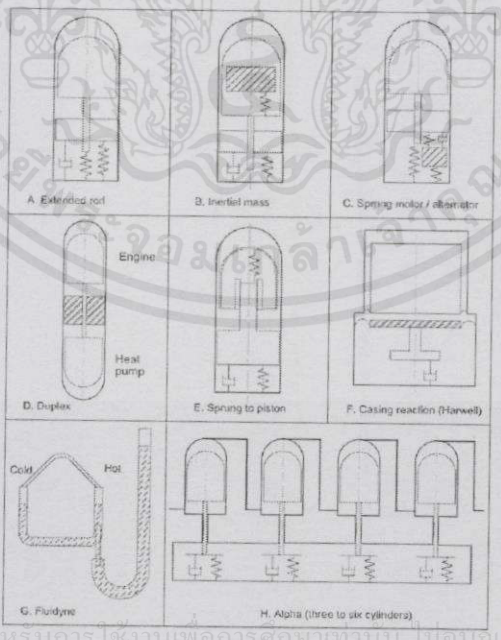
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟ่า

2.2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบอิสระ (Free Piston Stirling Engines)

เครื่องยนต์ชนิดนี้จะคล้ายกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า แต่จะขับเคลื่อนด้วยสปริงแทนข้อเหวี่ยงเครื่องยนต์ชนิดนี้จึงเป็นต้นกำลังในแบบเชิงเส้นแทนที่จะเป็นแบบหมุน การทำงานของเครื่องยนต์ชนิดนี้จึงเป็นการเคลื่อนที่แบบขึ้นลง โดยการสั่นของสปริงนั้นจะต้องไม่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติของสปริงที่ใช้



รูปที่ 2.7 รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิด Free Piston

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 กฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อแรกจะเกี่ยวกับพลังงานทุกชนิด พลังงานเป็นสิ่งที่ไม่สูญสลายเพียงแต่มัน สามารถเปลี่ยนรูปได้ ไม่สามารถสร้างหรือผลิตออกมาได้ตัวอย่างเช่น เครื่องยนต์ เมื่อให้พลังงานความร้อนกับเครื่องยนต์ เครื่องยนต์จะมีพลังงานจลย์ และพลังงานความร้อนออกมา ซึ่งผลรวมของพลังงานจลย์และพลังงานความร้อนจะมีค่าเท่ากับค่าพลังงานความร้อนที่ให้กับเครื่องยนต์

2.3.2 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่สองจะเกี่ยวข้องกับระบบวัฏจักรความร้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์โดยตรง คำจำกัดความของกฎข้อที่สองมีผู้ให้คำจำกัดความไว้สองคนคือ เคลวิน แพลงค์ และ คอลเซียส โดยเคลวิน แพลงค์ กล่าวไว้ว่า “ไม่มีวัฏจักรหรืออุปกรณ์ใดที่ให้พลังงานความร้อนเข้าไปและได้งานออกมาเท่ากับพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไป” กล่าวคือ เครื่องยนต์ไม่มีทางที่จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 100% และอีกหนึ่งคำจำกัดความโดย คอลเซียสซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับระบบเครื่องทำความเย็นและฮีตปั้มคือ “เป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างอุปกรณ์ที่จะทำให้วัฏจักรความร้อนทำงานได้โดยไม่ต้องให้งานกับระบบเพื่อที่จะให้ความร้อนจากที่อุณหภูมิต่ำกว่าไปอยู่ที่อุณหภูมิสูงกว่า” ซึ่งนี่คือหลักการของฮีตปั้มคือเมื่อให้งานเข้าไปในวัฏจักรความร้อนแล้วจะมีพลังงานความร้อนที่ถูกดูดเข้าไปและให้พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าออกมา

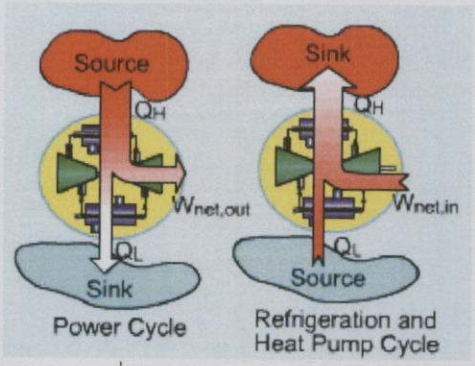
2.3.3 เครื่องยนต์ความร้อน

เครื่องยนต์ความร้อนคือ อุปกรณ์ที่ทำงานเป็นวัฏจักรโดยเมื่อให้ความร้อนกับเครื่องยนต์เครื่องยนต์ก็จะผลิตกำลังงานออกมา ซึ่งกำลังงานมาจากการให้ความร้อนกับแก๊ส เมื่อแก๊สอุณหภูมิสูงจะเกิดการขยายตัวและมีแรงดันลูกสูบให้ขับเคลื่อนไปได้ และจะต้องมีความร้อนออกมาด้วยซึ่งความร้อนตรงนี้จะถูกนำทิ้งไปด้วยระบบหล่อเย็น

2.3.4 เครื่องทำความเย็นและฮีตปั้ม

เครื่องทำความเย็นและฮีตปั้มเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้าง และหลักการทำงานที่เหมือนกันแต่การใช้งานนั้นต่างกัน โดยหลักการของเครื่องทำความเย็นคือ มีวัฏจักรความร้อนเมื่อทำงานจะดูดเอาความร้อนจากภายในไปสู่ภายนอก ส่วนฮีตปั้มก็ใช้หลักการดูดความร้อนจากภายนอกเข้ามาสู่ภายในซึ่งการที่ระบบจะทำงานได้คือ จะต้องให้งานกับระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นปฏิกิริยากลับกันของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของวัฏจักรความร้อน

2.3.5 ระบบ

ระบบในวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ หมายถึง สิ่งที่มีขอบเขต อาจจะเป็นขอบเขตในจินตนาการ เช่น ในมอเตอร์ไฟฟ้า, แบตเตอร์รี่ หรือเพลาและกังหันของเครื่องบิน การกำหนดขอบเขตของระบบอาจจะเป็นที่ไหนก็ได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ว่าจะศึกษาคุณสมบัติใดที่จุดไหน เช่น ในเครื่องยนต์แบบสูบชัก ระบบอาจจะคิดเฉพาะของไหลภายในกระบอกสูบ หรืออาจจะรวมทั้งการไหล ลูกสูบหรือก้านสูบ หรืออาจจะคิดรวมทั้งหมดของตัวเครื่องก็ได้ แบ่งออกเป็น

1.ระบบปิด มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ระบบไม่มีการไหล หมายถึง ในขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงาน สนใจเฉพาะตัวกลางที่อยู่ในขอบเขตที่อยู่ในระบบเท่านั้น เช่น การเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงานในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ เป็นต้น แต่ถึงอย่างไรก็ดี พลังงานอาจเคลื่อนที่ออกหรือเข้าระบบได้ ส่วนมวลของสารตัวกลางของระบบปิดไม่ได้ไหลออกนอกขอบเขต

2.ระบบเปิด หมายถึง ระบบที่มีการเปลี่ยนรูปของพลังงานและมวลของสารตัวกลางจะมีการเคลื่อนที่ผ่าขอบเขตของระบบด้วยอัตราที่คงที่หรือไม่ก็ได้ และ พลังงานจะมีการเคลื่อนที่ผ่าขอบเขตของระบบได้ โดยเคลื่อนที่ไปโดดเดี่ยว หรือไปพร้อมกับมวลของสารตัวกลาง

2.3.6 วัฏจักร

คือกระบวนการหลายๆ อันของระบบที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน จากสภาพหนึ่ง และ เมื่อเกิดขึ้นครบวัฏจักรแล้วจะกลับมาอยู่ที่สภาพเดิม วัฏจักรหนึ่งจะประกอบด้วยกี่กระบวนการก็ได้ กระบวนการเป็นลักษณะที่ระบบเปลี่ยนแปลงจากสภาวะหนึ่งเป็นอีกสภาวะหนึ่ง เช่น กระบวนการปริมาตรคงที่ กระบวนการความดันคงที่ กระบวนการอุณหภูมิคงที่ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7 วัฏจักรความร้อนในอุดมคติ

วัฏจักรคาร์โน

วัฏจักรคาร์โนเป็นวัฏจักรที่ถือว่ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้เป็นวัฏจักรพื้นฐานของเครื่องยนต์ทุกชนิด ประกอบด้วยกระบวนการที่อุณหภูมิคงที่สองกระบวนการ และกระบวนการไอเซ็นโทรปิคสองกระบวนการ ดังแสดงใน P-V และ T-S ไดอาแกรมดังรูปที่ 2.9

รูปที่ 2.9 วัฏจักรคาร์โน

(ก) กระบวนการอัดแบบอุณหภูมิคงที่

(ข) กระบวนการอัดแบบ Isentropic

(ค) กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่

(ง) กระบวนการขยายตัวแบบ Isentropic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วง 1-2 รูปที่ 2.9(ก) เป็นกระบวนการที่มีอุณหภูมิคงที่และมีความร้อนออกจากระบบช่วงนี้

ช่วง 2-3 รูปที่ 2.9(ข) เป็นกระบวนการไอเซนโทรปิค เป็นช่วงที่สารตัวกลางถูกอัดให้มีปริมาตรเล็กลง ไม่มีการถ่ายเทความร้อน

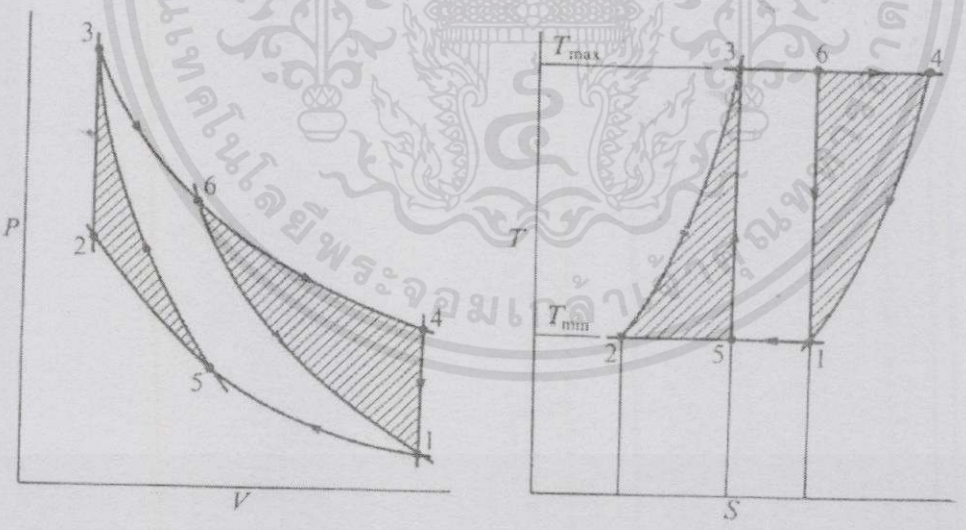
ช่วง 3-4 รูปที่ 2.9(ค) เป็นกระบวนการที่อุณหภูมิคงที่อีกเช่นกัน แต่ความร้อนเข้าสู่ระบบในช่วงนี้

ช่วง 4-1 รูปที่ 2.9(ง) เป็นกระบวนการไอเซนโทรปิคอีกครั้ง แต่สารตัวกลางจะขยายตัว

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรคาร์โนซึ่งมีค่าเท่ากับ $(T_{max}-T_{min})/\ T_{max}$ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดในวัฏจักรความร้อนทุกชนิด การปรับปรุงประสิทธิภาพให้มีค่าสูงขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิสูงสุด หรือลดอุณหภูมิต่ำสุดหรือทำพร้อมกันทั้งสองกรณี การเพิ่มอุณหภูมิจะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของโลหะด้วย

2.3.8 วัฏจักรสเตอร์ลิง

เป็นวัฏจักรที่ใช้ในเครื่องยนต์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถผลิตงานได้มากเมื่อเทียบกับวัฏจักรคาร์โนในสภาพที่ทำงาน เช่น อุณหภูมิ และปริมาตรการดูดเท่ากันวัฏจักรสเตอร์ลิงจะให้งานมากกว่าสองเท่าของวัฏจักรคาร์โน ดังแสดงจาก P-V และ T-S ไดอาแกรมรูปที่ 2.10 แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนทั้งสองวัฏจักรแล้วเท่ากัน

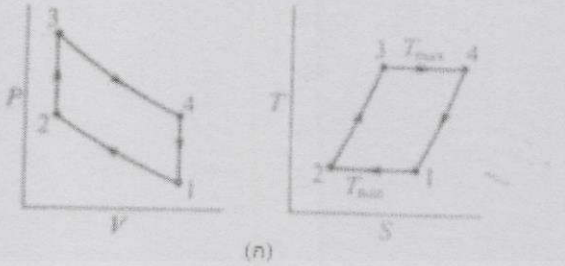


รูปที่ 2.10 วัฏจักรสเตอร์ลิงและวัฏจักรคาร์โน ทั้งสองวัฏจักรมีพื้นที่ที่ทับซ้อนกันเมื่อค่าตัวแปรสูงสุด ต่ำสุดของอุณหภูมิ ความดัน และปริมาตรมีค่าเท่ากัน

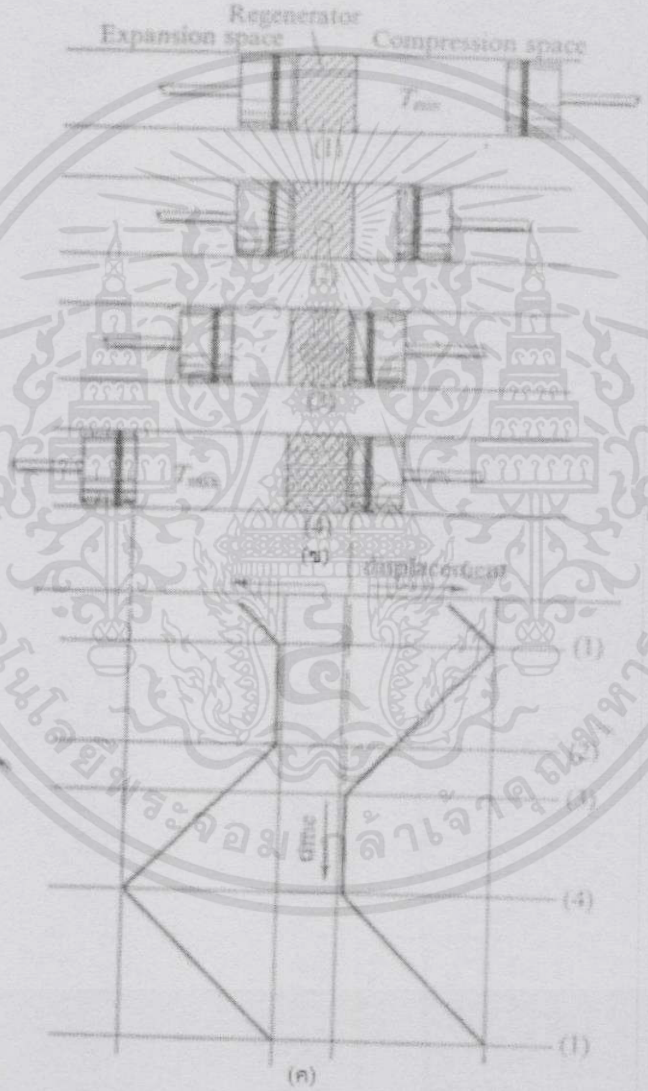
พื้นที่แรเงาบน P-V Diagram คือ การเพิ่มขึ้นของกำลังงานวัฏจักรสเตอร์ลิง

พื้นที่แรเงาบน T-S Diagram คือ การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทพลังงานความร้อนวัฏจักรสเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ค)

รูปที่ 2.11 วัฏจักรสเตอร์ลิง

(ก) P-V และ T-S ไดอาแกรม

(ข) ตำแหน่งของลูกสูบในแต่ละกระบวนการ

(ค) ไดอาแกรม เวลา-ระยะทางลูกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณา รูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงรูปแบบของวัฏจักรสเตอร์ลิง พร้อมทั้งจังหวะการทำงานของลูกสูบทั้งสองรูปที่นำมาประกอบกัน รีเจนเนอร์เรเตอร์ในรูปเปรียบเทียบเสมือนสิ่งที่สามารถปล่อยหรือรับความร้อนมาได้ รูปร่างของรีเจนเนอเรเตอร์จะเป็นในลักษณะของตะแกงขดลวดโลหะ บริเวณด้านหนึ่งระหว่างลูกสูบและรีเจนเนอเรเตอร์ จะมีอุณหภูมิสูงสุดคงที่เสมอ เรียกว่า “บริเวณขยายตัว” และปริมาตรอีกด้านที่เหลือจะมีอุณหภูมิต่ำสุดคงที่เสมอ เรียกว่า “บริเวณอัดตัว” ในการพิจารณาระบบของวัฏจักรนี้ สมมติว่าไม่มีการนำความร้อนตามแนวยาว, ไม่มีความเสียดทานระหว่างลูกสูบกับผนัง และระบบเป็นระบบปิด

ในช่วงเริ่มต้นของวัฏจักร สมมติให้ลูกสูบชุดอัดอยู่ที่จุดศูนย์ตายล่าง และลูกสูบชุดขยายตัวอยู่ที่จุดศูนย์ตายบน ติดกับชุดรีเจนเนอร์เรเตอร์ ดังนั้นความดันและอุณหภูมิที่จุดนี้จะมีค่าต่ำสุด สามารถแสดงได้ด้วยจุด 1 บน P-V และ T-S ไดอาแกรม ระหว่างการอัดตัว (ช่วงที่ 1-2) ลูกสูบชุดอัดจะเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์ตายบน ส่วนลูกสูบชุดขยายจะยังคงอยู่นิ่งที่ตำแหน่งเดิมอยู่ ดังนั้นปริมาตรของอากาศจะถูกอัดตัวในบริเวณอัดตัวและความดันจะเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิจะยังคงที่ เนื่องจากความร้อนถูกนำออกสู่สิ่งแวดล้อมรอบกระบอกสูบ

ในช่วง 2-3 ลูกสูบทั้งสองตัวจะเคลื่อนที่พร้อมกัน กล่าวคือลูกสูบชุดอัดจะเคลื่อน เข้าหาจุดศูนย์ตายบน ส่วนลูกสูบชุดขยายจะเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์ตายบน ดังนั้นปริมาตรของอากาศจะยังคงที่อยู่ อากาศจึงถูกส่งผ่าตัวรีเจนเนอร์เรเตอร์จากบริเวณอัดตัวสู่บริเวณขยายตัว ดังนั้นอากาศจะรับความร้อนจากตัวรีเจนเนอเรเตอร์ ทำให้อุณหภูมิหลังจากผ่าออกมาจากตัวรีเจนเนอร์เรเตอร์มีค่าสูงสุด ในช่วงปริมาตรจะยังคงที่อยู่ จึงทำให้ความดันของอากาศสูงขึ้น

ช่วง 3-4 ลูกสูบชุดขยายตัวยังคงเคลื่อนที่สู่จุดศูนย์ตายล่างของตัว แต่ลูกสูบชุดอัดจะยังคงอยู่ที่จุดศูนย์ตายบน ทำให้ความดันของอากาศลดลง เนื่องจากปริมาตรของอากาศเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของอากาศจะยังคงที่อยู่ เนื่องจากมีการให้ความร้อนเข้าสู่ระบบจากแหล่งความร้อนภายนอก

ช่วง 4-1 ลูกสูบทั้งสองจะเคลื่อนที่พร้อมกัน กล่าวคือ ชุดขยายตัวเคลื่อนสู่จุดศูนย์ตายบน ส่วนชุดอัดตัวเคลื่อนที่สู่จุดศูนย์ตายล่าง ปริมาตรในช่วงนี้จะคงที่ และอากาศจะเคลื่อนทีจากบริเวณขยายตัวสู่บริเวณอัดตัว โดยผ่าตัวรีเจนเนอเรเตอร์และทำให้ความร้อนกลับคืนสู่ชุดรีเจนเนอร์เรเตอร์ด้วย ดังนั้นอุณหภูมิหลังจากผ่าชุดรีเจนเนอร์เรเตอร์เข้าสู่บริเวณอัดตัวจึงมีค่าต่ำสุด ด้วยเหตุนี้เองความดันของอากาศจึงลดลงด้วย

สรุปกระบวนการของวัฏจักรสเตอร์ลิงประกอบด้วย 4 กระบวนการดังนี้

กระบวนการ 1-2 เป็นการอัดตัวโดยที่อุณหภูมิคงที่ ความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิต่ำสุดจะถ่ายเทเข้าสู่ระบบภายนอก

กระบวนการ 2-3 เป็นกระบวนการที่มีปริมาตรคงที่ ความร้อนจะถูกส่งไปให้อากาศโดยตัวรีเจนเนอเรเตอร์ และมีอุณหภูมิสูงสุดที่ลูกสูบชุดขยาย

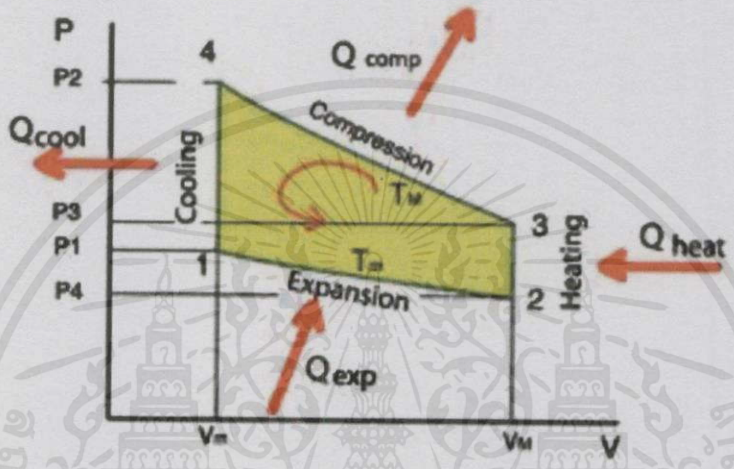
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่อีกครั้งหนึ่ง โดยความร้อนจะถูกส่งผ่าไปให้อากาศที่ลูกสูบขยาย จากแหล่งความร้อนในภายนอกตลอดเวลา

กระบวนการ 4-1 เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่ ความร้อนจากอากาศจะถูกถ่ายเทให้กับชุดรีเจนเนอเรเตอร์ และมีอุณหภูมิต่ำสุดที่ลูกสูบชุดอัด

2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อใช้เป็นเครื่องทำความเย็น

หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อใช้เป็นเครื่องทำความเย็น



รูปที่ 2.12 P-V ไดอาแกรมเมื่อเป็นฮีตปั๊ม

หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อใช้เป็นเครื่องทำความเย็นมีดังนี้

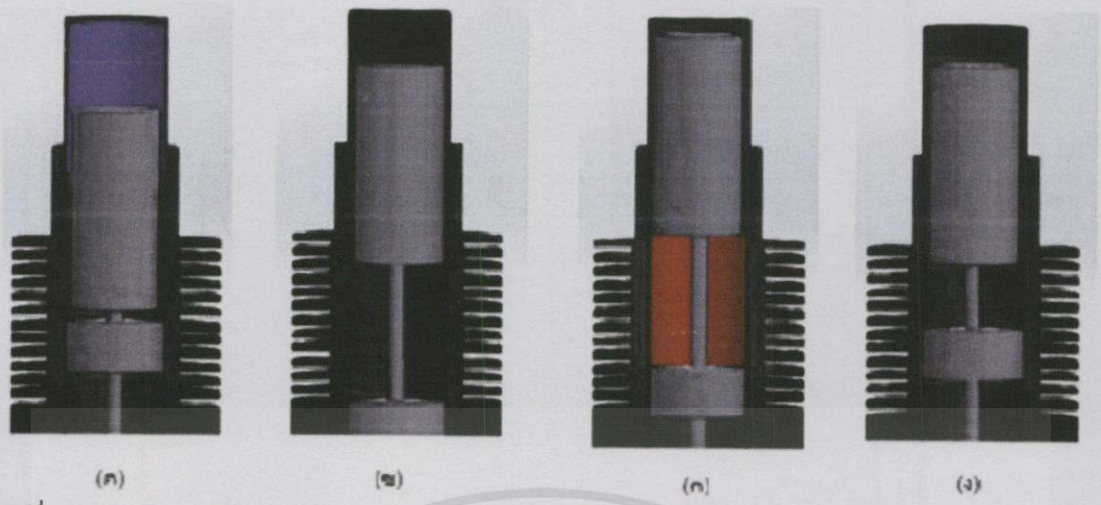
กระบวนการ 4-1 เป็นกระบวนการลดความดันที่ปริมาตรคงที่ ทำให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอก

กระบวนการ 1-2 เป็นกระบวนการขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่ โดยความร้อนจะถูกดึงเข้ามาสู่ภายในระบบ

กระบวนการ 2-3 เป็นกระบวนการเพิ่มความดันตัวที่ปริมาตรคงที่ จะทำให้แก๊สอุณหภูมิสูงขึ้นจนมากกว่าอุณหภูมิภายนอก

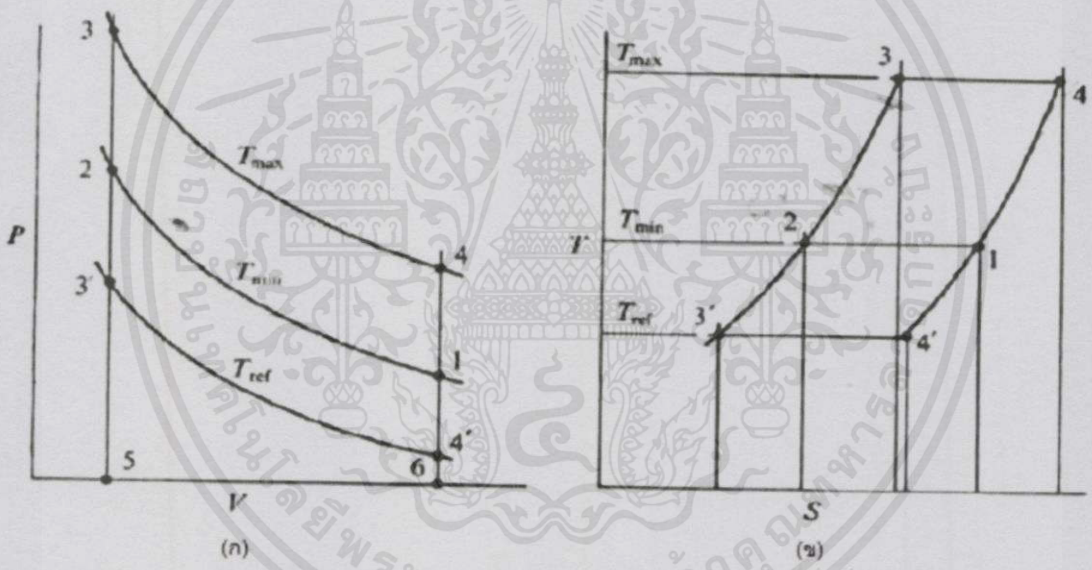
กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการอัดตัวที่อุณหภูมิคงที่ โดยแก๊สจะถ่ายเทความร้อนสู่ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 (ก) กระบวนการ 4-1 (ข) กระบวนการ 1-2 (ค) กระบวนการ 2-3 (ง) กระบวนการ 3-4

2.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องยนต์และฮีตปั๊มของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



รูปที่ 2.14 P-V และ T-S ไดอาแกรมของเครื่องยนต์และฮีตปั๊ม

จากรูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องยนต์และฮีตปั๊มของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยพื้นที่ด้านบนจะเป็นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เมื่อทำงานเป็นเครื่องยนต์ส่วนด้านล่างเป็นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เมื่อทำงานเป็นฮีตปั๊ม จากภาพจะพบว่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทออกสู่ภายนอกของเครื่องยนต์และของฮีตปั๊มจะมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ข้อแตกต่างของวัฏจักรสเตอร์ลิงใช้งานจริงกับในอุดมคติ

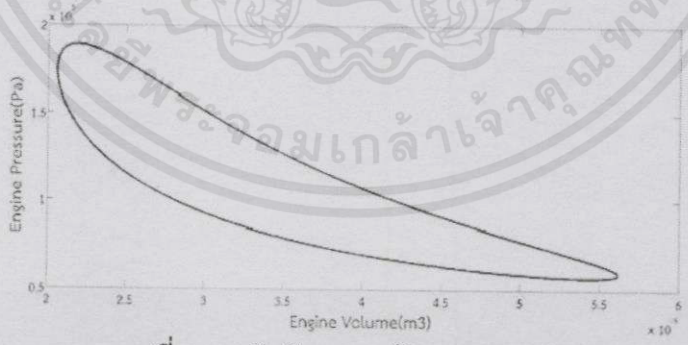
ในทางปฏิบัติแล้ว ไม่สามารถที่จะสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้ทำงานตามวัฏจักรในอุดมคติได้เลย เนื่องจาก

1. ในวัฏจักรอุดมคติ ได้สมมติให้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกลับไปมาได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะเกิดเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกลับไปแล้วกลับมาไม่ได้ หมายความว่าเมื่ออากาศเปลี่ยนจากสภาวะหนึ่งมาสู่อีกสภาวะหนึ่งแล้ว ในกรณีที่ต้องการจะกลับมาสู่สภาวะเดิมนั้น คุณสมบัติ เช่นความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิ ไม่สามารถเปลี่ยนกลับมาสู่สภาวะเริ่มต้นได้ครบทุกตัว หรืออาจจะไม่ได้เลยทั้งสามตัว

2. สมมติให้กระบวนการอัดและขยายตัวในวัฏจักรสเตอร์ลิงเป็นกระบวนการที่มีอุณหภูมิคงที่ นั้นเป็นกระบวนการอัดและขยายตัวที่ความร้อนคงที่ ดังนั้นจะต้องสามารถรับการถ่ายเทความร้อนขนาดมหาศาลระหว่างอากาศและกระบอกสูบ

3. อากาศในวัฏจักรทั้งหมดตามทฤษฎีจะพิจารณาแต่เพียงบริเวณที่อัดและขยายตัวเท่านั้นซึ่งในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแล้ว จำเป็นต้องมีพื้นที่ของตัวรีเจนเนอร์เรเตอร์ ช่องว่างที่หัวลูกสูบ ปริมาตรของที่ที่เชื่อมโยงระหว่างบริเวณอัด และบริเวณขยาย

4. ลูกสูบทั้งสองในวัฏจักรอุดมคติมีการเคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งกลไกจริงแล้วส่วนมากจะเป็นการเคลื่อนที่ในรูปของซิมเปิลฮาร์โมนิครอบเพลาข้อเหวี่ยง (เคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง) ทำให้ช่วง P-V ไดอาแกรมที่ได้ออกมาเป็นรูปมนตลอดไม่มีการหักเป็นมุมใดๆทั้งสิ้น และยังส่งผลให้เกิดการสูญเสียความดันทำให้งานที่ผลิตออกมาลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วัฏจักรสเตอร์ลิงแบบของจริง

5. วัฏจักรในอุดมคติไม่ได้คิดผลต่อเนื่องจากการสูญเสียของแรงเสียดทานระหว่างลูกสูบกับผนังกระบอกสูบ ซึ่งในทางปฏิบัติจริงๆแล้ว ความเสียดทานย่อมจะต้องมีอยู่เสมอเมื่อ ผิวทั้งสองสัมผัสกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. วัฏจักรในอุดมคติสมมติให้ตัวรีเจนเนอร์เรเตอร์มีประสิทธิภาพร้อยเปอร์เซ็น ในการที่รับความร้อนและคลายความร้อนให้กับอากาศเพื่อทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำสุด และสูงสุดในวัฏจักรอย่างแท้จริง ซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้วรีเจนเนอร์เรเตอร์ไม่สามารถกระทำได้

2.6 หลักในการคำนวณและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

2.6.1 การคาดประมาณกำลังงานที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตได้

วิธีนี้เป็นของวิลเลียม บีล ซึ่งได้ประมาณกำลังที่เครื่องผลิตได้ โดยไม่ได้แบ่งชนิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เป็นสูตรสมการง่ายๆ คือ

$$P = 0.015 \times p \times f \times V_o \qquad (2.1)$$

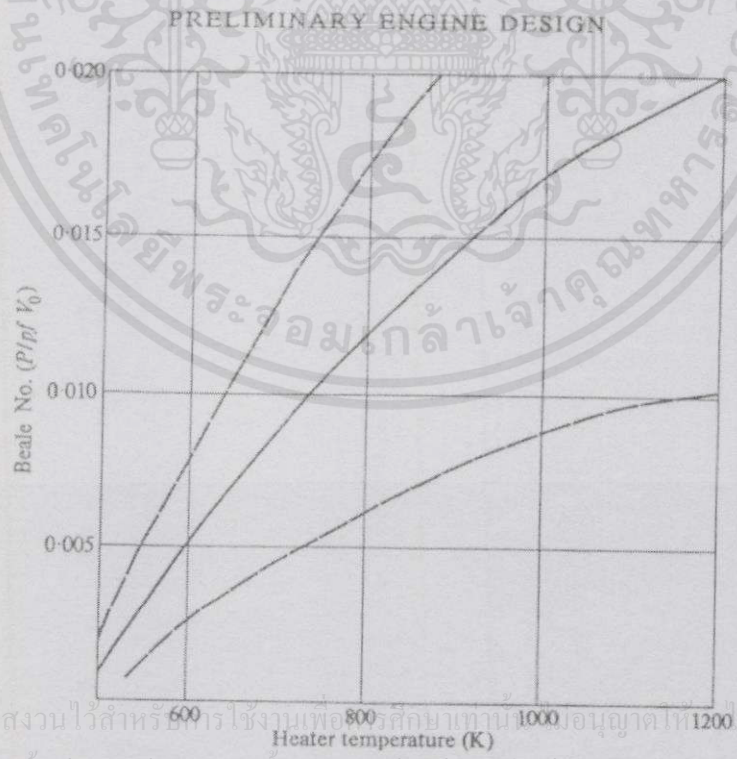
P = กำลังงานที่เครื่องผลิตได้ (W)

p = ความดันเฉลี่ยของวัฏจักร (bar)

f = ความถี่ (รอบ/วินาที)

V_o = ปริมาตรแทนที่ลูกสูบกำลัง (cm^3)

0.015 คือ บีลนัมเบอร์



รูปที่ 2.16 กราฟบีลนัมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นสามารถจัดกลุ่มตัวแปร $\frac{P}{pfV_o}$ ซึ่งชื่อว่า "บีลนัมเบอร์" และมีผู้ได้ทำการศึกษาค้นคว้ากลุ่มตัวแปรนี้ โดยให้อุณหภูมิต่ำสุดของวัฏจักรอยู่ที่ 65 องศาเซลเซียส และแปรเปลี่ยนเฉพาะอุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักรซึ่งสามารถสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.16 ส่วนกราฟเส้นประสองเส้นบนล่างคือ แสดงถึงขอบเขตในการออกแบบเครื่องยนต์ที่ดี (อุณหภูมิต่ำสุดต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียส) หรือพอใช้ (อุณหภูมิต่ำสุดสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส)

2.6.2 ประสิทธิภาพทางความร้อน

ในการประมาณค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ปกติจะคิดเพียง 50% ของประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรคาร์โน ได้สมการดังนี้

$$\eta = 0.5x \left[\frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}}\right] \quad (2.2)$$

2.6.3 ตัวแปรสำคัญในการออกแบบ

ตัวแปรที่เลือกสำหรับการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้แก่

1. อัตราส่วนอุณหภูมิ $\tau = \frac{T_{min}}{T_{max}}$ เป็นอัตราส่วนอุณหภูมิของบริเวณอัดตัว ต่อบริเวณขยายตัว

2. อัตราส่วนปริมาตรกวาด $K = \frac{V_C}{V_E}$ เป็นอัตราส่วนของปริมาตรกวาดในบริเวณอัดต่อบริเวณขยายตัว

3. อัตราส่วนปริมาตรตาย $X = \frac{V_D}{V_E}$ เป็นปริมาตรทั้งหมดของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (รวมรูและท่อต่างๆ) ต่อปริมาตรบริเวณขยายตัว

4. มุมเฟส α หมายถึงมุมที่ลูกสูบดิสเพสเซอร์นำลูกสูบกำลัง (ปกติคือ 90 องศา)

5. ความดันของแก๊ส อาจรู้ค่าความดันสูงสุด หรือความดันเฉลี่ยก็ได้

6. ความเร็วรอบของเครื่อง

7. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและช่วงชักของลูกสูบและดิสเพสเซอร์ในบริเวณขยายตัว

การคำนวณโดยอาศัยสมการของชมิทธ์ จะได้สมการดังนี้

ปริมาตรขณะมุมใดๆ ของบริเวณขยายตัว

$$V_e = 0.5V_E\,(1 + \cos \emptyset) \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรขณะมุมใดๆ ของบริเวณอัดตัว

$$V_c = 0.5V_C\ (1 + \cos(\emptyset - \alpha)) \tag{2.4}$$

ความดันขณะใดๆ

$$p = p_{max}(1 - \delta)/[1 + \delta\cos(\emptyset - \theta)] \tag{2.5}$$

เมื่อ

$$\delta = (\tau^2 + K^2 + 2\tau K\cos\alpha)^{1/2}/(\tau + K + 2S) \tag{2.6}$$

$$\theta = \tan^{-1}[K\sin\alpha/(\tau + K\cos\alpha)] \tag{2.7}$$

$$S = 2X\tau/(\tau + 1) \tag{2.8}$$

อัตราส่วนความดัน

$$p_{max}/p_{min} = (1 + \delta)/(1 - \delta) \tag{2.9}$$

ความดันเฉลี่ย

$$p_{mean} = p_{max}[(1 - \delta)/(1 + \delta)]^{1/2} \tag{2.10}$$

กำลังงานสุทธิต่อรอบ

$$P = p_{max}V_T\,\pi\frac{(1-\tau)}{(K+1)}\left(\frac{1-\delta}{1+\delta}\right)^{1/2}\frac{\delta\sin\theta}{\left(1+(1-\delta^2)^{1/2}\right)} \tag{2.11}$$

เมื่อ

$$V_T = (V_E + V_C) = (1+K)V_E \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังต่อหน่วยมวลของแก๊ส

$$P_{mass} = \frac{\pi(1-\tau)(1+\delta\cos\theta)(\delta\sin\theta)}{(1-\delta^2)\left[1+(1-\delta^2)^{1/2}\right]\left[\tau+\frac{K}{2}(1+\cos\alpha)+S\right]} \quad (2.13)$$

ประสิทธิภาพทางความร้อน

$$\eta = \left[\frac{T_{max}-T_{min}}{T_{max}}\right] = (1-\tau) \quad (2.14)$$

การถ่ายเทความร้อนในบริเวณขยายตัวต่อวัฏจักร

$$Q_E = \pi p_{mean} V_E \frac{\delta\sin\theta}{1+(1-\delta^2)^{1/2}} \quad (2.15)$$

อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนในบริเวณอัดตัวต่อวัฏจักร

$$Q_C = \tau Q_E \quad (2.16)$$

สำหรับเป็นกรณีใช้เป็นเครื่องทำความเย็น
ความร้อนเมื่อดึงออกจากการขยายตัวของแก๊ส

$$Q_E = (p_{max}V_T)\frac{\pi}{(K+1)}\left(\frac{1-\delta}{1+\delta}\right)^{1/2}\frac{\delta\sin\theta}{\left[1+(1-\delta)^{1/2}\right]} \quad (2.17)$$

ความร้อนที่ดึงออกต่อมวลของแก๊ส

$$Q_{mass} = \frac{\pi(1+\delta\cos\theta)\delta\sin\theta}{(1-\delta)^{1/2}\left(1+(1-\delta^2)^{1/2}\right)\left[\tau+\frac{K}{2}(1+\cos\alpha)+S\right]} \quad (2.18)$$

Coefficient of performance (COP)

$$COP_{ref} = \frac{T_E}{(T_E-T_C)} = \frac{1}{(1-\tau)} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่ถูกถ่ายออกจากกระบวณการอัด

$$Q_C = \frac{1}{\tau} Q_E \tag{2.20}$$

กำลังที่ต้องให้กับเครื่องยนต์

$$P = (1 - \tau) Q_E \tag{2.21}$$

เครื่องยนต์กรณีใช้งานเป็น Heat Pump
ความร้อนจากการอัดต่อวัฏจักร

$$Q_C = (p_{max} V_T) \frac{\pi\tau}{(K+1)} \left(\frac{1-\delta}{1+\delta}\right)^{1/2} \frac{\delta \sin\theta}{\left[1+(1-\delta)^{1/2}\right]} \tag{2.22}$$

ความร้อนจากการอัดต่อมวลของแก๊ส

$$Q_{mass} = \frac{RT_C \pi (1+\delta\cos\theta)\delta\sin\theta}{(1-\delta)^{1/2}\left(1+(1-\delta^2)^{1/2}\right)\left[\tau+\frac{K}{2}(1+\cos\alpha)+S\right]} \tag{2.23}$$

Coefficient of Performance

$$COP_{hp} = \frac{T_C}{T_C - T_E} = \frac{\tau}{(1-\tau)} \tag{2.24}$$

ความร้อนถ่ายเทเข้าระบบ

$$Q_E = \tau Q_C \tag{2.25}$$

กำลังที่ต้องให้กับเครื่องยนต์

$$P = Q_C \frac{(1-\tau)}{\tau} \tag{2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบขนาดและชิ้นส่วนประกอบเครื่องยนต์

ในการสร้างเครื่องต้นแบบนั้น ได้ทำการออกแบบเพื่อให้ขนาดเหมาะสมกับงบประมาณ และสร้างเพื่อใช้ในการทดลองและศึกษาการทำงานองเครื่องยนต์ วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุที่หาง่ายหาได้ตามท้องตลาดทั่วไป เงื่อนในการออกแบบมีดังนี้

3.1 ขนาดและขีดจำกัดของเครื่องยนต์

ตารางที่ 3.1 ตารางค่าขนาดของเครื่องยนต์

ชิ้นส่วน/ตัวแปร	ค่า/ชนิด
ชนิดเครื่องยนต์	เบต้า
สารทำงาน	อากาศ
การระบายความร้อน	น้ำ
รัสมีข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง	7มม.
รัสมีข้อเหวี่ยงลูกสูบดิสเพสเซอร์	10.9มม.
Connecting rod Piston	51มม.
Connecting rod Displacer	25 มม.
เส้นผ่าศูนย์กลางลูกสูบกำลัง	20 มม.
เส้นผ่าศูนย์กลางลูกสูบดิสเพสเซอร์	19 มม.
ความดันเฉลี่ยเครื่องยนต์	100kPa
อุณหภูมิด้านร้อน	873K
อุณหภูมิด้านเย็น	371K
ปริมาตรส่วนรับความร้อน	8.27e-6 ลบ.ม.
ปริมาตรส่วนระบายความร้อน	6.85e-6 ลบ.ม.
บีลนัมเบอร์	0.007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

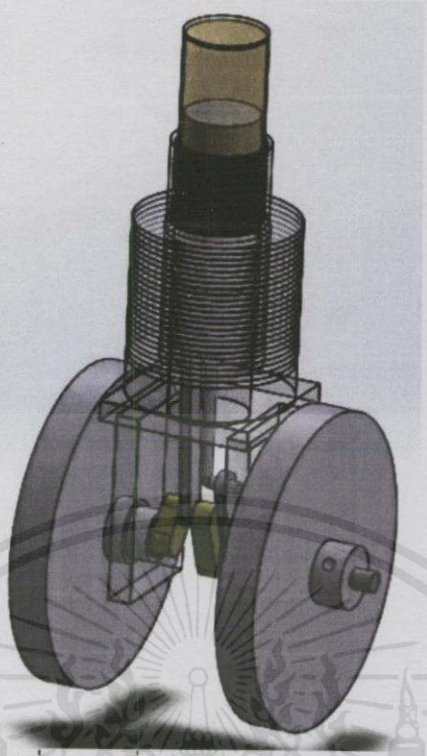
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ออกแบบ

ส่วนประกอบ	วัสดุ	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	ยาว (มม.)
ลูกสูบกำลัง	Aluminium Alloy 7075	20	16
กระบอกสูบ	Aluminium Alloy 7075	26	70
ดิสเพสเซอร์	Aluminium	19	43
ฝาสูบ	ทองเหลือง	22	49
ล้อช่วยแรง	Aluminium Alloy 7075	80	10
Connecting Rod Piston	ทองเหลือง		51
Connecting Rod Displacer	ทองเหลือง		25
ข้อเหวี่ยง	ทองเหลือง		

3.2 ส่วนประกอบองเครื่องยนต์

ส่วนประกอบองเครื่องยนต์แต่ละส่วนได้ออกแบบมา เพื่องานในจุดประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นวัสดุที่เลือกใช้จึงต้องแตกต่างกัน ซึ่งรายละเอียดขนาดของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นสามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



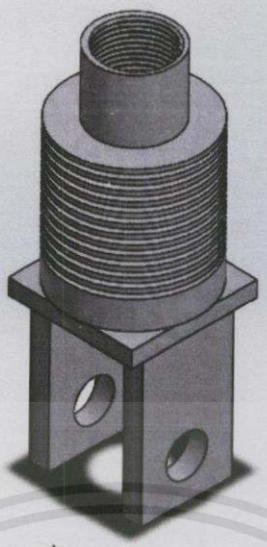
รูปที่ 3.1 เครื่องยนต์ในโปรแกรม CAD

3.2.1 ฝาสูบทำจากทองเหลืองเพราะทองเหลืองนั้นมีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดี การออกแบบฝาสูบสำหรับเครื่องที่ไม่ได้มีการอัดเสริมกำลังนั้นฝาสูบควรที่จะมีผนังที่บางให้มากที่สุด เพื่อลดผลของการสูญเสียทางความร้อน

รูปที่ 3.2 ฝาสูบ

3.2.2 กระบอกสูบด้านเย็นและครีบระบายความร้อน ทำจาก Aluminium Alloy 7075 เพราะกระบอกสูบเป็นชิ้นส่วนที่ถูกขัดสีอยู่ตลอด จึงควรเลือกใช้โลหะที่มีความแข็งสูงเพื่อลดการสึก หรอ ผลิตด้วยการกลึงและ CNC ด้านในกระบอกสูบถูกขัดให้เรียบมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

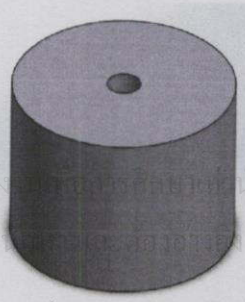


รูปที่ 3.3 กระบอกสูบ

3.2.3 เพลาข้อเหวี่ยง แกนเพลาทำจากอลูมิเนียมส่วนข้อในแต่ละข้อทำจากทองเหลือง ชิ้นส่วนเชื่อมติดกันทั้งหมดด้วยกาวล็อคไทด์

รูปที่ 3.4 เพลาข้อเหวี่ยง

3.2.4 ลูกสูบกำลัง ทำจาก Aluminium Alloy 7075 ทั้งนี้เพราะต้องการความแข็งเพื่อที่จะสามารถทำการขัดผิวให้เรียบเงาเพื่อลดผลของแรงเสียดทาน และขนาดของลูกสูบกับกระบอกสูบนั้นจะต้องขนาดพอดีกันมีช่องว่าง Clearance ไม่เกิน 0.02 มม.



รูปที่ 3.5 ลูกสูบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

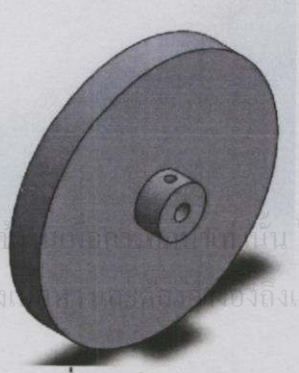
3.2.5 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ในการออกแบบลูกสูบดิสเพลสเซอร์นั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกสูบควรเล็กกว่ากระบอกสูบอยู่ที่ 5% และจะต้องทำให้ลูกสูบนั้นมีน้ำหนักเบาที่สุดเพื่อที่จะไม่กินกำลังของเครื่องยนต์

รูปที่ 3.6 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์

3.2.6 ก้านสูบลูกสูบกำลัง และก้านสูบลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ทำจากทองเหลืองก้านสูบนั้นควรที่จะมีน้ำหนักที่เบาที่สุดแต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความแข็งแรงด้วย

รูปที่ 3.7 ก้านสูบของลูกสูบกำลังและลูกสูบดิสเพลสเซอร์

3.2.7 ล้อช่วยแรง เป็นส่วนสำคัญมากส่วนหนึ่งของเครื่องยนต์ เพราะล้อช่วยแรงจะมีหน้าที่เก็บพลังงานที่ได้จากการขยายตัวของแก๊สเอาไว้ เพื่อจะเอาไว้ใช้ในช่วงอัดกลับ การออกแบบล้อช่วยแรงถ้าออกแบบให้มีน้ำหนักเบาเกินไปอาจทำให้เครื่องยนต์วิ่งได้ไม่ดี หรืออาจไม่วิ่งเลยก็ได้ ถ้าหากออกแบบให้มีน้ำหนักมากเกินไปก็จะไปกินกำลังของเครื่องยนต์



รูปที่ 3.8 ล้อช่วยแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

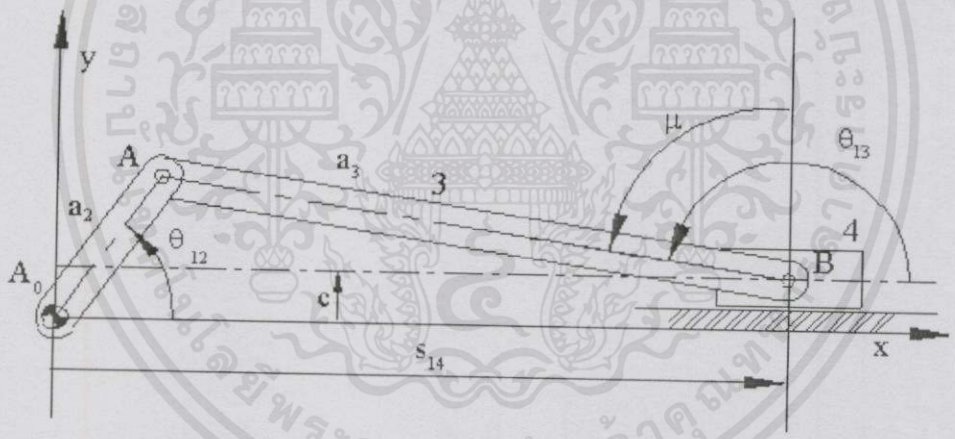
บทที่ 4
การวิเคราะห์วัฏจักรเครื่องยนต์

ในการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์นั้น มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องรู้ตัวแปรในการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์ขึ้นมา ตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ระยะชักตำแหน่งในกระบอกสูบ ปริมาตรในส่วนห้องอัดและส่วนห้องขยาย และขนาดชิ้นส่วนต่างๆ ของกลไก

4.1 การคำนวณการเคลื่อนที่ของกลไกลูกสูบ

เครื่องยนต์เครื่องนี้ขับเคลื่อนด้วยกลไก Four Bar Linkage ชนิด Slider Crank ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

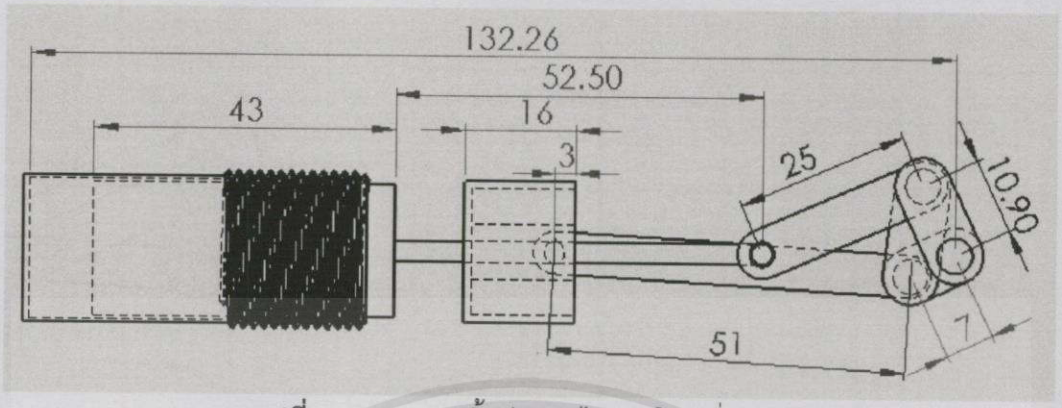
$$S_{14} = a_2 \cos\theta_{12} + \sqrt[2]{(a_3)^2 - (c + a_2 \sin\theta)^2} \qquad (4.1)$$



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงตัวแปรของกลไก Slider Crank

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การคำนวณตำแหน่งและปริมาตรภายในกระบอกสูบ



รูปที่ 4.2 แผนภาพชิ้นส่วนกลไกภายในเครื่องยนต์

จากรูปทำให้ได้สมการคำนวณตำแหน่งของลูกสูบ คือ

$$Y_d(\theta) = 10.9\cos(\theta) + \sqrt{(25)^2 - (10.9\sin(\theta))^2} + 52.5 \quad (4.2)$$

$$Y_p(\theta) = 7\cos(\theta - 90) + \sqrt{(51)^2 - (7\sin(\theta - 90))^2} + 13 \quad (4.3)$$

เมื่อ Y_d คือ ตำแหน่งของลูกสูบดิสเพลสซอร์

Y_p คือ ตำแหน่งของลูกสูบกำลัง

เมื่อรู้สมการการเคลื่อนที่ของลูกสูบแล้ว ทำให้สามารถหาปริมาตรในห้องอัดและห้องขยาย ณ เวลาใดๆภายในกระบอกสูบได้ โดยปริมาตรห้องขยายคือ ระยะห่างของลูกสูบดิสเพลสเซอร์กับผนังฝาสูบ และปริมาตรห้องอัดคือระยะห่างระหว่างลูกสูบกำลังและลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ทำให้ได้สมการเป็น

$$Y_e(\theta) = 132.26 - (Y_d(\theta) + 43) \quad (4.4)$$

$$Y_c(\theta) = Y_d(\theta) - Y_p(\theta) \quad (4.5)$$

เมื่อ Y_e คือ ระยะห่างของลูกสูบดิสเพลสซอร์กับผนังฝาสูบ

Y_c คือ ระยะห่างของลูกสูบดิสเพลสซอร์กับลูกสูบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

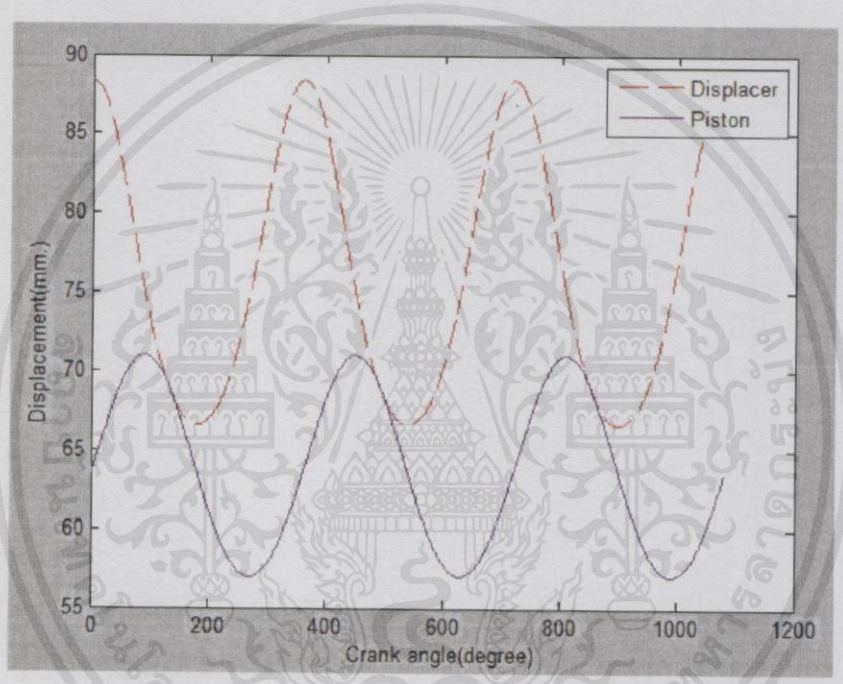
$$V_e(\theta) = \pi\frac{d^2}{4}(Y_e) \quad (4.6)$$

$$V_c(\theta) = \pi \frac{d^2}{4}(Y_c) \quad (4.7)$$

เมื่อ V_e คือ ปริมาตรในห้องขยาย (Expansion Chember)

V_c คือ ปริมาตรในห้องอัด (Compression Chember)

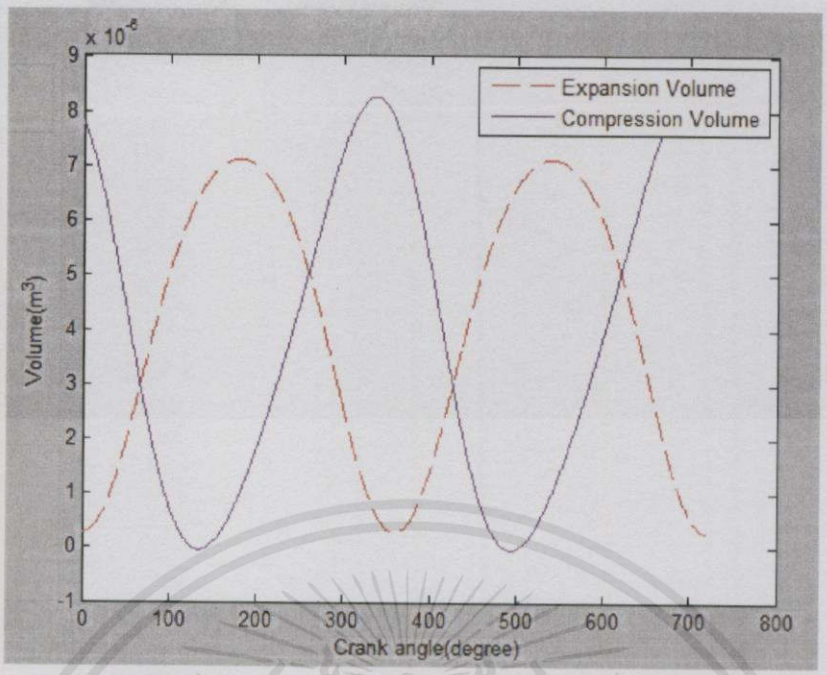
เมื่อนำสมการที่ (4.2) และสมการที่ (4.3) มาพิจารณาและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ก็จะสามารถเห็นตำแหน่งการเคลื่อนที่ระหว่างลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังตามมุมที่ข้อเหวี่ยงหมุนไปได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของลูกสูบ

และเมื่อนำสมการที่ (4.6) และสมการที่ (4.7)มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม *MATLAB* ทำให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของห้องขยายห้องอัดต่อมุมที่ข้อเหวี่ยงหมุนไปดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าปริมาตรของห้องอัดห้องขยาย

4.3 สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

1. การถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากระบบในช่วงรีเจนเนอเรทีฟ เป็นไปอย่างสมบูรณ์
2. ความดันที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากันทั้งระบบ
3. แก๊สภายในระบบจะต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามสมการ, PV = RT
4. ไม่มีการรั่วของแก๊สออกจากระบบและมวลของแก๊สภายในระบบคงที่
5. อุณหภูมิของกระบอกสูบและลูกสูบคงที่
6. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เมื่อทำงานคงที่
7. อุณหภูมิของแก๊สในระบบคงที่
8. ปริมาตรของแก๊สในระบบแปรเปลี่ยนไปตามรูปแบบ Sine Curve
9. ไม่มีการสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทาน

4.4 การวิเคราะห์แบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Analysis)

จากสมมติฐานที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อ 4.3 โดยการวิเคราะห์จะเริ่มจากสมมติฐานที่ว่ามวลในระบบคงที่ตามสมการที่ (4.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M = M_e + M_c + M_d \tag{4.8}$$

และจากแก๊สอุดมคติสามารถเปลี่ยนรูปสมการที่ (4.8) ได้เป็นสมการที่ (4.9)

$$M = \frac{PV_e}{RT_e} + \frac{PV_c}{RT_c} + \frac{PV_d}{RT_d} \tag{4.9}$$

เมื่อความดัน ณ แต่ล่ะจุดมีค่าเท่ากันจะได้สมการระบุความดันตามสมการที่ (4.10)

$$P = MR/\left[\frac{V_e}{T_e} + \frac{V_c}{T_c} + \frac{V_d}{T_d}\right] \tag{4.10}$$

โดยการแทนสมการที่ (4.6) และสมการที่ (4.77) ลงในสมการที่ (4.10) จะสามารถระบุความดันของเครื่องยนต์ ณ ตำแหน่งใดๆ ของลูกสูบได้ สามารถหางานสุทธิได้จากสมการที่ (4.11) ถึงสมการที่ (4.13)

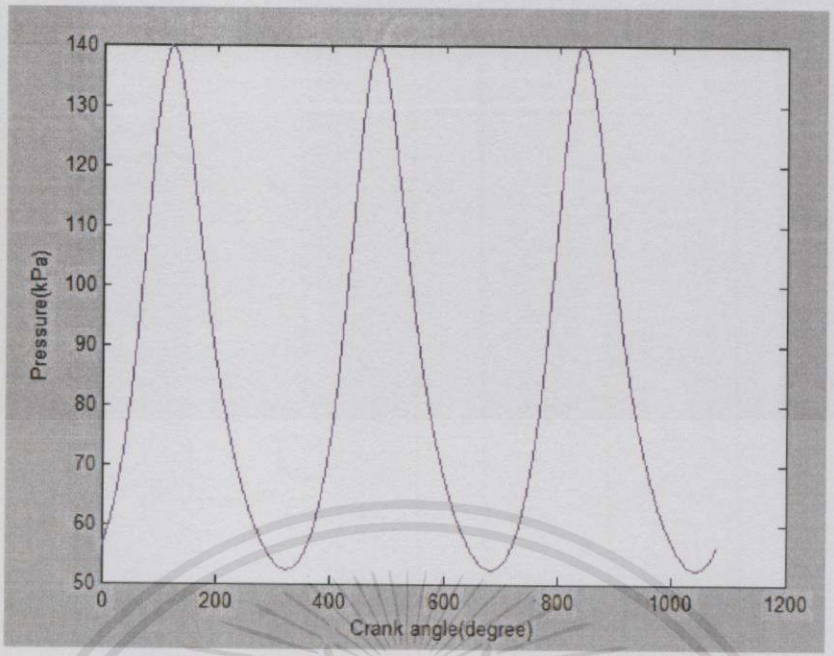
$$W_e = \int P dV_e \tag{4.11}$$

$$W_c = \int P dV_c \tag{4.12}$$

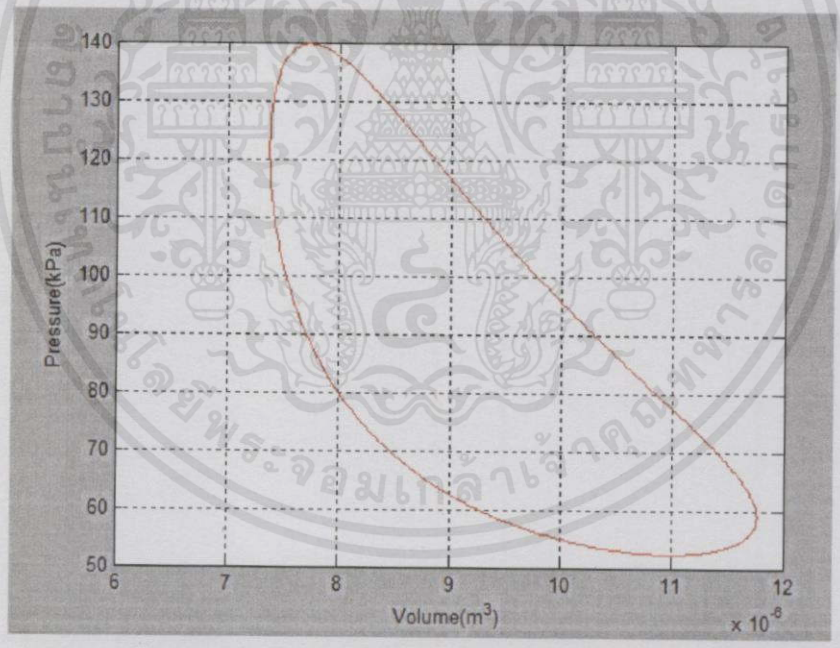
$$W_{net} = W_e + W_c \tag{4.13}$$

ต่อมาจะทำการแทนค่าวิเคราะห์สมการโดยโปรแกรม MATLAB เพราะว่าสมการมีความซับซ้อนมากจึงต้องอาศัยการเขียนโค้ดหลังจากการวิเคราะห์แล้ว จะได้กราฟค่าความดันในแต่ล่ะมุมที่ข้อเหวี่ยงหมุนไป และ P-V Diagram ของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความดันภายในเครื่องยนต์ต่อมุมของข้อเหวี่ยงที่หมุนไป



รูปที่ 4.6 P-V Diagram เครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณวัฏจักรของเครื่องยนต์

ค่าที่ได้จากวัฏจักร	ขนาด
ค่าความดันสูงสุด	139.45kPa
ค่าความดันต่ำสุด	52.2723kPa
งานที่ได้จากการยายตัว	0.93642J
งานที่ใช้ในการอัดกลับ	0.39796J
งานสุทธิของวัฏจักร	0.53846J

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การทดสอบและผลการทดสอบ

5.1 การทดสอบเครื่องยนต์

ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์นั้นจะแบ่งการทดลองออกเป็นสองการทดลองคือ

1. การทดสอบแบบ No Load Test

การทดสอบแบบไม่มีโหลดคือ การทดสอบโดยทำการจับเวลาและเริ่มให้ความร้อน เมื่ออุณหภูมิมากพอจึงทำการสตาร์ตเครื่องได้และให้เครื่องวิ่งไปเรื่อยๆ และทำการวัดค่าอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น และวัดค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟอุณหภูมิ และความเร็วรอบต่อเวลาเดินไปเพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์

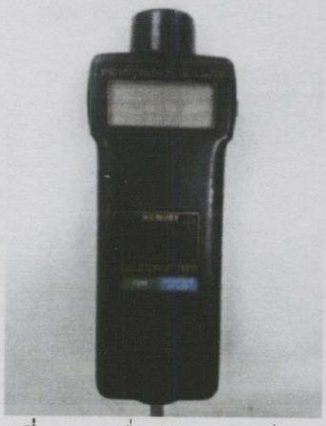
2. การทดสอบแบบ Load Test

การทดสอบแบบมีโหลดเป็นทดสอบโดยใช้ Dynamo meter แบบเชือกรัด โดยการทดลองคือจะนำเชือกคล้องกับเพลาของเครื่องยนต์และเชือกด้านหนึ่งจะต่อกับต่างสปริง และอีกด้านหนึ่งจะต่อกับภาชนะเพื่อใส่ก้อนน้ำหนักทดสอบแล้วทำการใส่ก้อนน้ำหนักเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และดูการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบจนกระทั่งเครื่องหยุดวิ่ง จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์และนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ และสามารถหาค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ได้ แต่สำหรับเครื่องยนต์เครื่องนี้นั้นไม่สามารถทำการทดสอบแบบนี้ได้ เนื่องจากกำลังของเครื่องยนต์นั้นน้อยส่งผลให้แรงบิดน้อยตาม ซึ่งเครื่องมือไม่สามารถที่จะวัดค่าออกมาได้

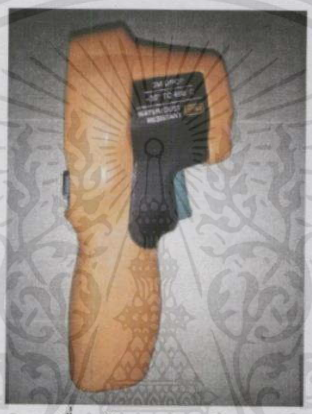
5.2 อุปกรณ์ที่ในการทดลอง

1. เครื่องวัดความเร็วรอบ
2. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด
3. มัลติมิเตอร์ต่อสายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล
4. เครื่องจับเวลา
5. ฮีตเตอร์ 117W
5. ที่จับหลอดทดลอง
6. เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

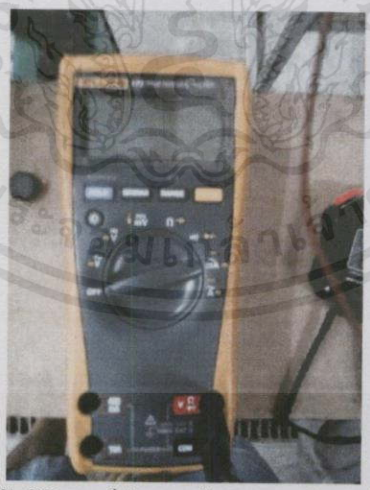
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 เครื่องวัดความเร็วรอบ



รูปที่ 5.2 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด

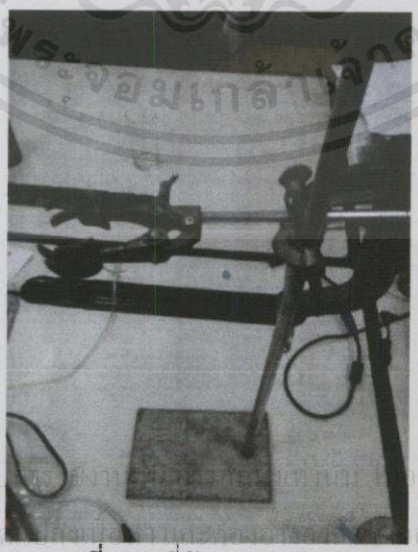


รูปที่ 5.3 มัลติมิเตอร์ต่อสายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4 เครื่องจับเวลา

รูปที่ 5.5 ฮีตเตอร์



รูปที่ 5.6 ที่จับหลอดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.7 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

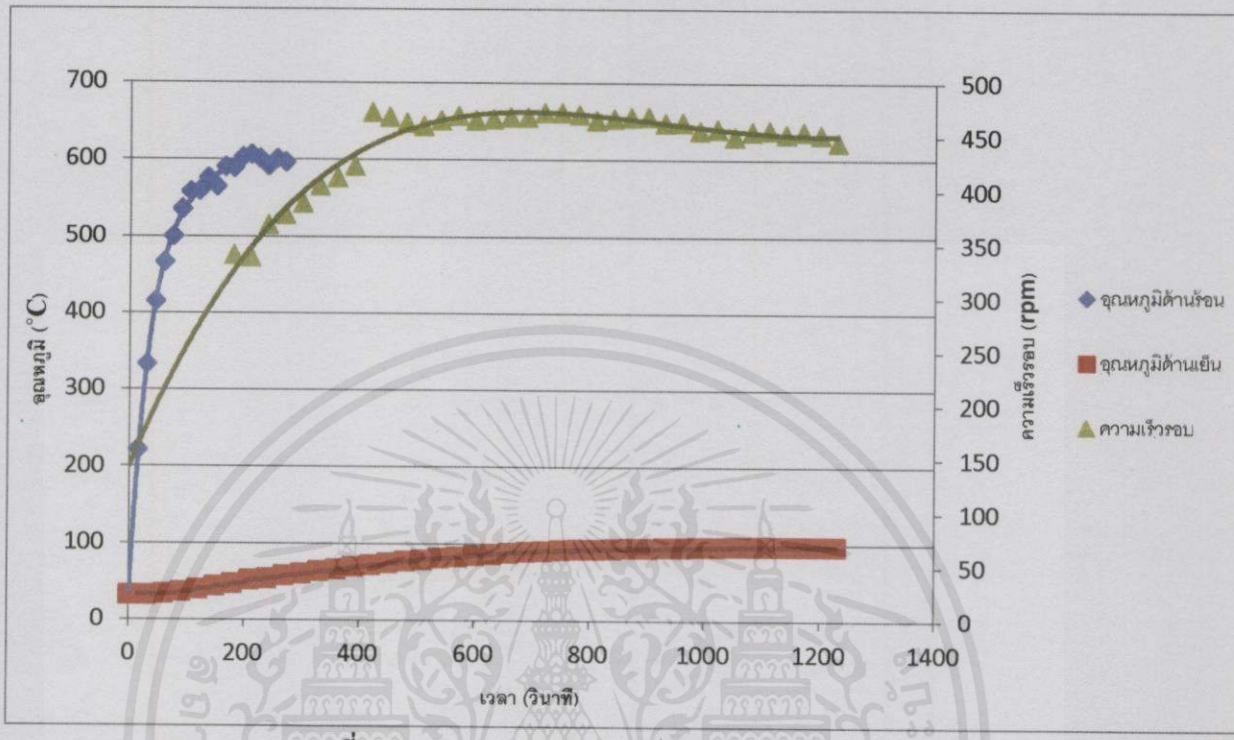
5.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำเครื่องยนต์มาจับกับที่จับหลอดทดลองและยึดที่จับหลอดทดลองกับโครงเหล็ก
2. ติดตั้งเครื่องวัดรอบเข้ากับโครงเหล็ก เอาด้านแสงจ่อเข้าหากับล้อช่วยแรง
3. นำมัลติมิเตอร์ต่อกับสายเทอร์โมคัปเปิล และนำเทอร์โมคัปเปิลเสียบเข้าช่องครีบระบายความร้อน
4. เติมน้ำลงในที่ใส่น้ำตรงด้านเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิด้านเย็นให้คงที่
5. ทำการให้ความร้อนและเริ่มจับเวลาบันทึกค่าอุณหภูมิ และบันทึกค่าความเร็วรอบเมื่อเครื่องเริ่มเดิน

รูปที่ 5.8 รูปแสดงการเตรียมการทดอง

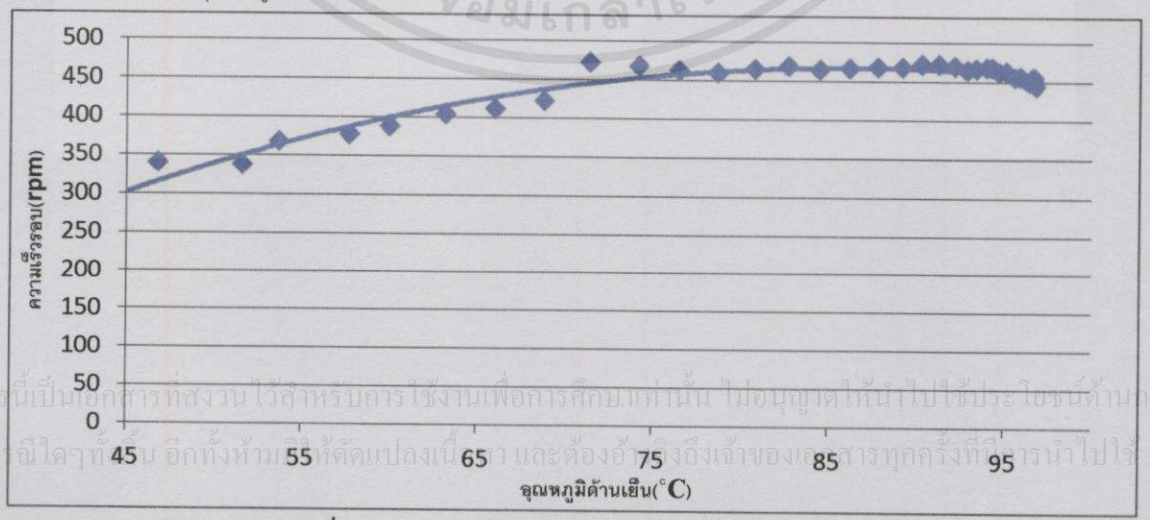
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการทดสอบ



รูปที่ 5.9 กราฟอุณหภูมิ ความเร็วรอบต่อเวลา

จากการทดสอบเมื่อนำผลการทดสอบค่าอุณหภูมิ และความเร็วรอบมาพล็อตเป็นกราฟพบว่าอุณหภูมิด้านร้อนจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 180 วินาทีหรือประมาณ 3 นาที และจะเป็นเวลาที่เครื่องสามารถเริ่มเดินได้ และเครื่องยนต์จะมีความเร็วรอบสูงสุดเมื่อเวลาผ่านไป 420 วินาทีหรือประมาณ 7 นาที หลังจากนั้นความเร็วรอบจะลดลงเรื่อยๆ และจะคงที่เมื่ออุณหภูมิด้านเย็นคงที่อยู่ที่ 96-97 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่น้ำเดือด



รูปที่ 5.10 กราฟความเร็วรอบต่ออุณหภูมิด้านเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ได้พบว่าความเร็วรอบสูงสุดจะเกิดเมื่ออุณหภูมิด้านเย็นอยู่ที่ประมาณ 70-80 องศา ที่เป็นเช่นนี้เพราะช่วงอุณหภูมินี้เป็นช่วงที่อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อน จากด้านร้อนเข้ามาจากด้านเย็นออกไปเป็นไปอย่างรวดเร็วสัมพันธ์กันมากที่สุดส่วนช่วงอุณหภูมิอื่น ถ้าช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70-80 องศา จะเป็นช่วงที่ใช้เวลาในการให้ความร้อนในส่วนด้านร้อนยาวนานกว่า ส่วนช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่า 70-80 องศา การถ่ายเทความร้อนออกจะเป็นไปได้ช้ากว่า ทำให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จึงลดลง และประกอบกับการที่จะต้องใช้พลังงานมากกว่าในการอัดแก๊สที่อุณหภูมิสูงกลับไปให้มีปริมาตรลดลง

5.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเครื่องยนต์ต้นแบบที่ทดลองสร้างมานั้น สามารถทำงานตามวัฏจักรสเตอร์ลิงได้ และส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์มากส่วนหนึ่งคืออุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิด้านร้อนนั้นยิ่งสูงยิ่งดี แต่ควรคำนึงถึงขีดจำกัดของวัสดุส่วนอุณหภูมิด้านเย็นควรออกแบบการระบายความร้อน และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในจุดที่ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

6.1 สรุป

การดำเนินงานวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ไม่ทั้งหมด เครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นสามารถวิ่งได้แต่มีกำลังน้อยกว่าที่คาดการณ์เอาไว้มาก จากการทดสอบพบว่าเครื่องยนต์มีแรงบิดน้อยจึงไม่สามารถขับโหลดได้ การประมาณกำลังสำหรับเครื่องนี้โดยใช้สมการอย่างง่ายของบีล คือ $P = 0.007 \times p \times f \times V_o$ ได้กำลังเพียง 0.23W ซึ่งแหล่งความร้อนที่คือฮีตเตอร์ไฟฟ้า 117W ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้แค่ 0.1966% ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าการออกแบบและคุณภาพของวัสดุที่ใช้นั้นยังไม่ดีพอประกอบกับการผลิตซึ่งต้องใช้ความละเอียดสูง และทำการผลิตได้ยากจึงทำให้เครื่องยนต์นั้นมีกำลังที่ค่อนข้างน้อย แต่อย่างน้อยเครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นมาก็สามารถวิ่งได้ถือว่าบรรลุวัตถุประสงค์ไปในระดับหนึ่ง

6.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องยนต์ต้นแบบนั้นมีกำลังน้อย เป็นเพราะตัวเครื่องยนต์นั้นมีขนาดเล็กหากจะทำการปรับปรุงเพิ่มเติมเกรงว่าจะไม่คุ้ม แต่ถ้าหากในอนาคตอยากจะพัฒนาต่อจริงๆ ก็ควรที่จะทำการสร้างใหม่และทำการขยายสเกลให้เครื่องมีขนาดใหญ่มากขึ้น และควรจะต้องมีการปรับปรุงแบบเครื่องยนต์ให้ดีกว่านี้ อย่างเช่น ควรออกแบบการระบายความร้อนให้ดีกว่านี้ ลูกสูบดิสเพลสเซอร์สามารถที่จะติดรีเจนเนอร์เรเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้น ห้องเครื่องยนต์สามารถออกแบบให้อัดความดันได้ก็จะเป็นการเพิ่มกำลังให้กับเครื่องยนต์ได้มากขึ้นอีกทางหนึ่ง ซึ่งถ้าหากทำได้ดีจริงก็จะสามารถนำไปใช้กับงานอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] G.Walker , .STIRLING ENGINE , Oxford University Press , New York , 1980

[2] ณัฐ ชมภูนิช, สมพร สุระวรรณวิจิตร, สุรินทร์ ประสาทพรชัย, **"เครื่องยนต์สเตอร์ลิง"**, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตธนบุรี , กรุงเทพฯ , พศ.2527

[3] กลวัชร เฉลิมพงศ์, ก่อกานต์ เมธาลักษณ์, นัทธพงศ์ ชูธนสุนทร, **"การปรับปรุงและพัฒนากลไก Ross Yoke สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟ่า"**, ปริญญานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ , พศ.2556

[4] พิทยา ชัยสวัสดิ์, ยศวริศ ศุภประภาวณิชย์, อมร ชาวอบทม, **"การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบตา"**, ปริญญานิพนธ์ภาควาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวะกรราศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พศ.2553

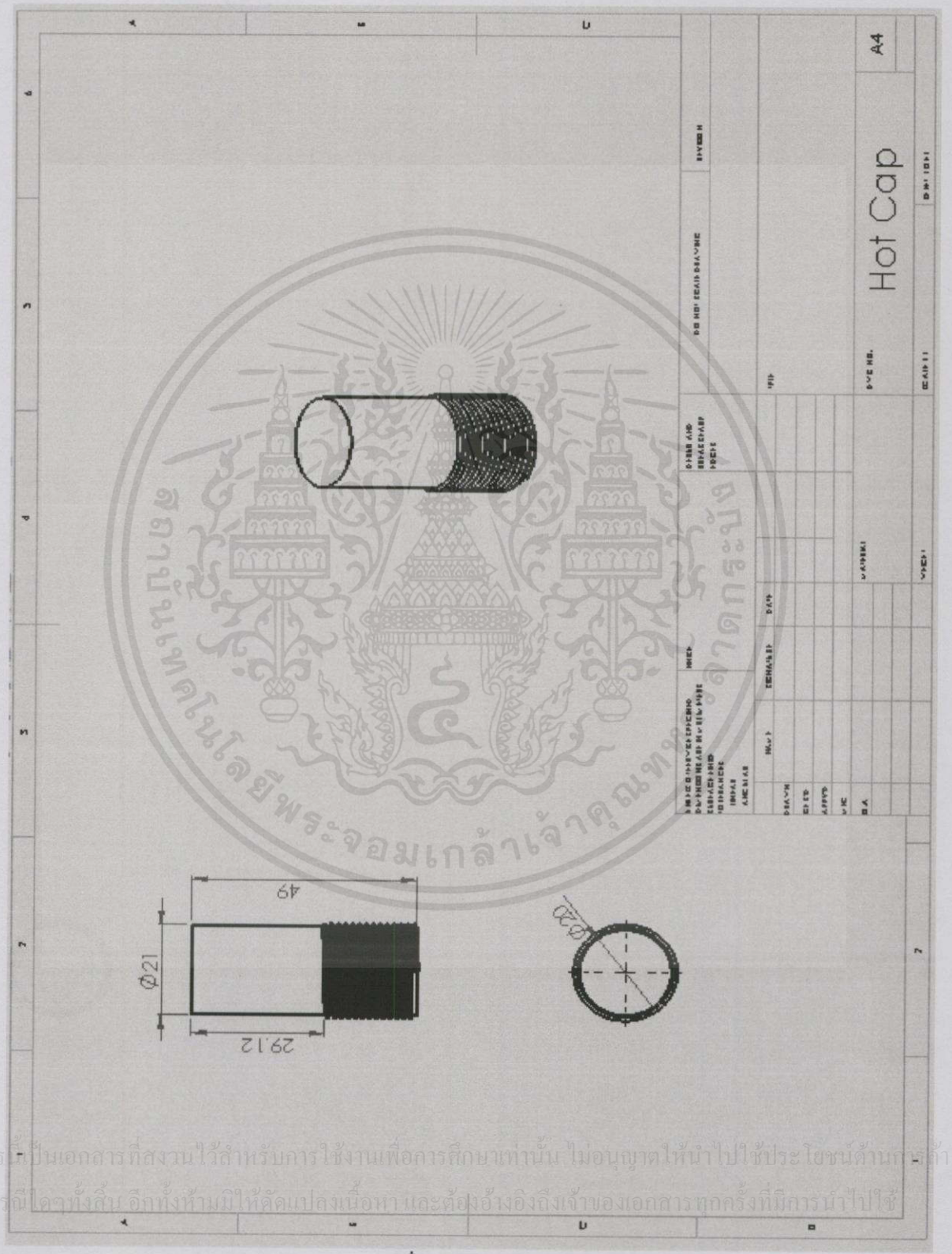
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

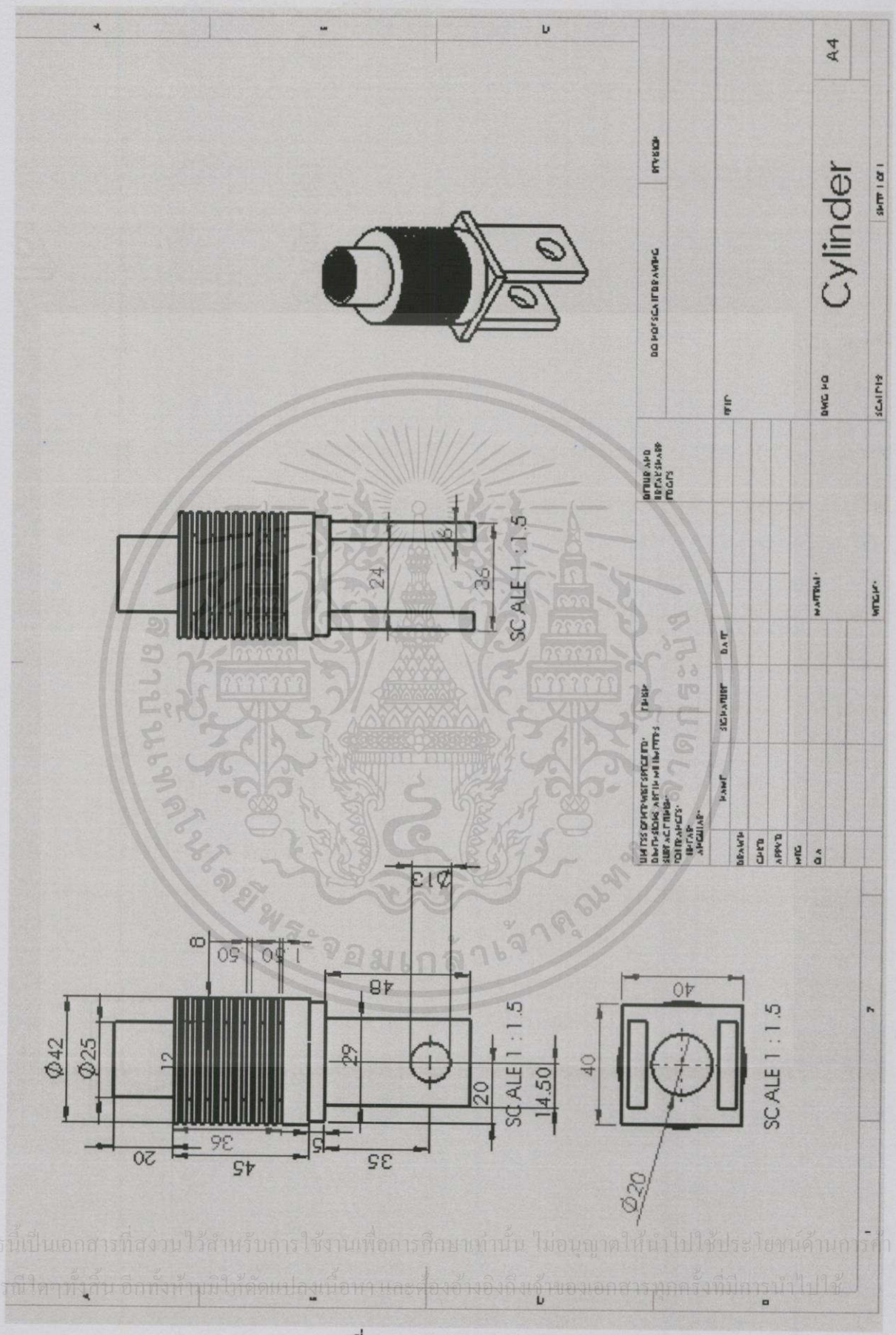
ภาคผนวก ก.

แบบเขียนและขนาดส่วนประกอบต่างๆของชิ้นงาน



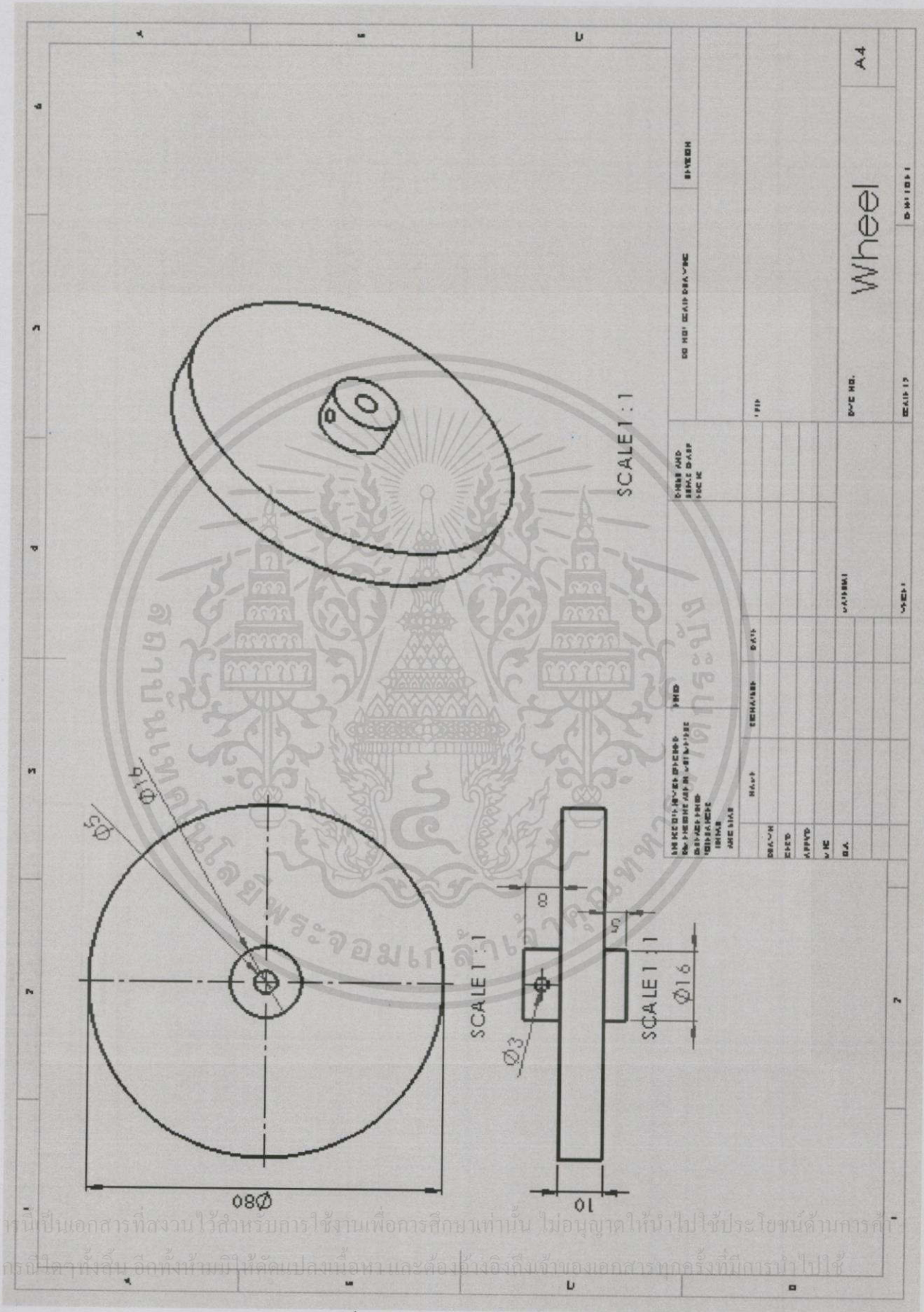
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.1 ฝาสูบ



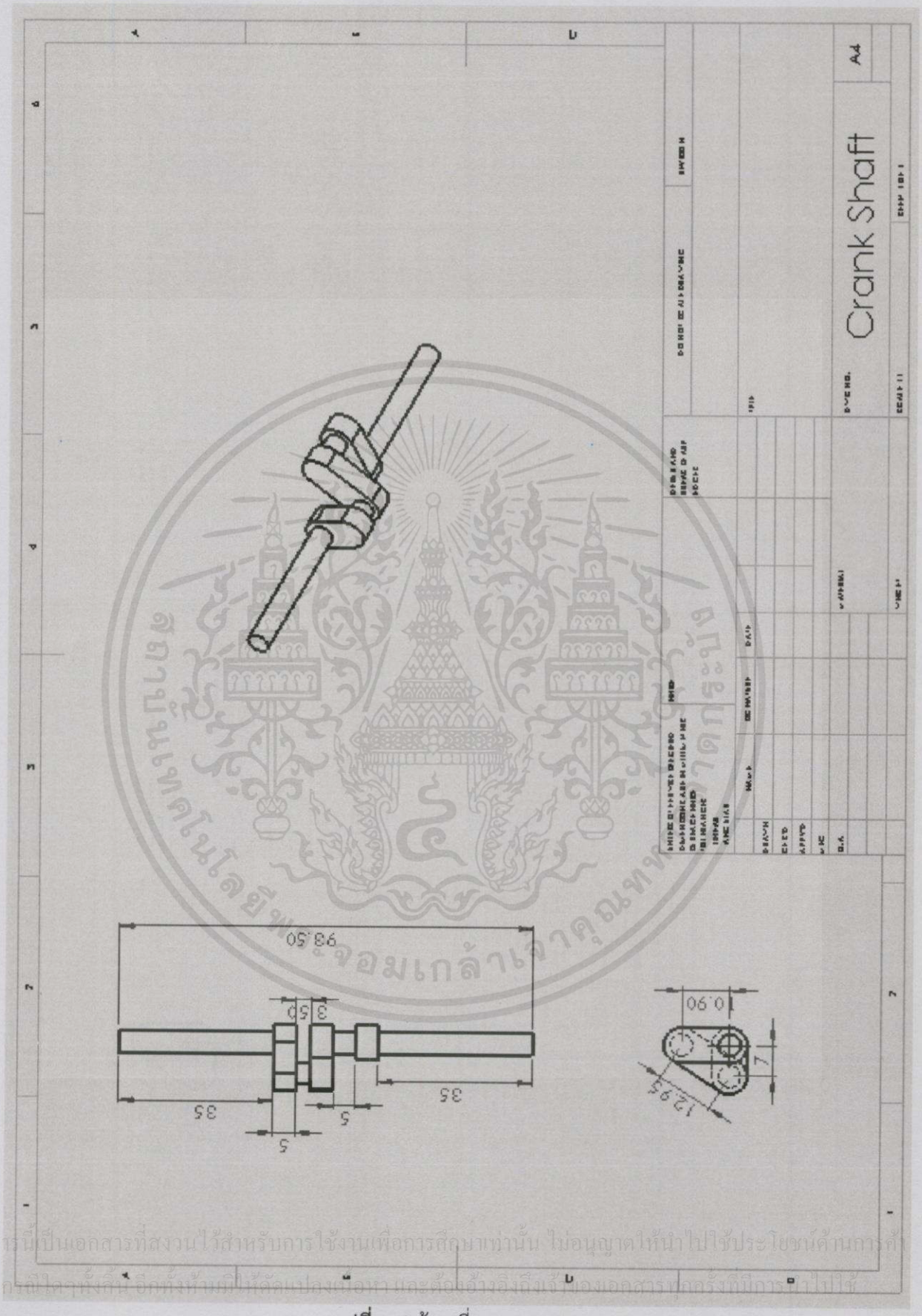
รูปที่ ก.2 กระบอกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



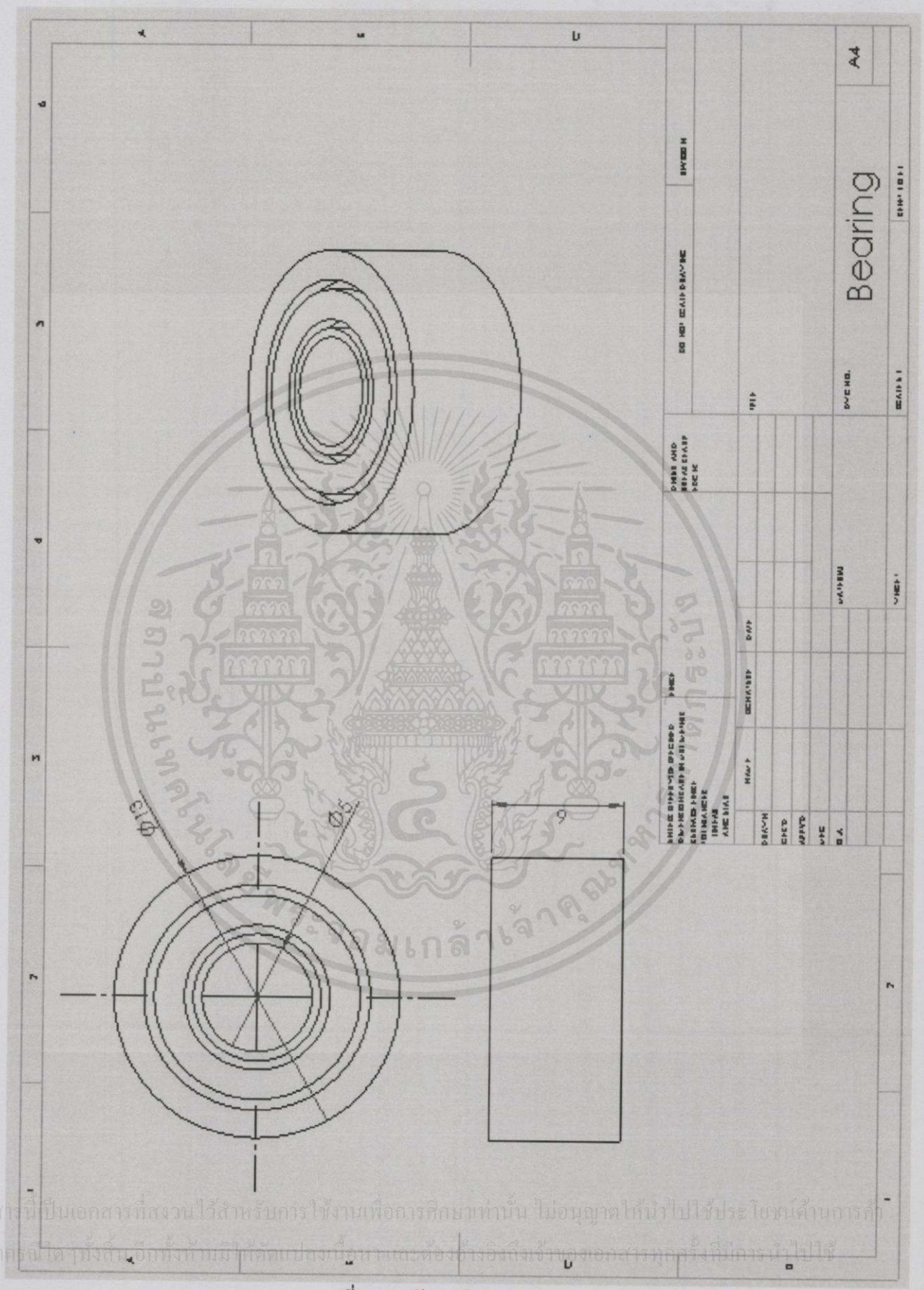
รูปที่ ก.3 ล้อช่วยแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



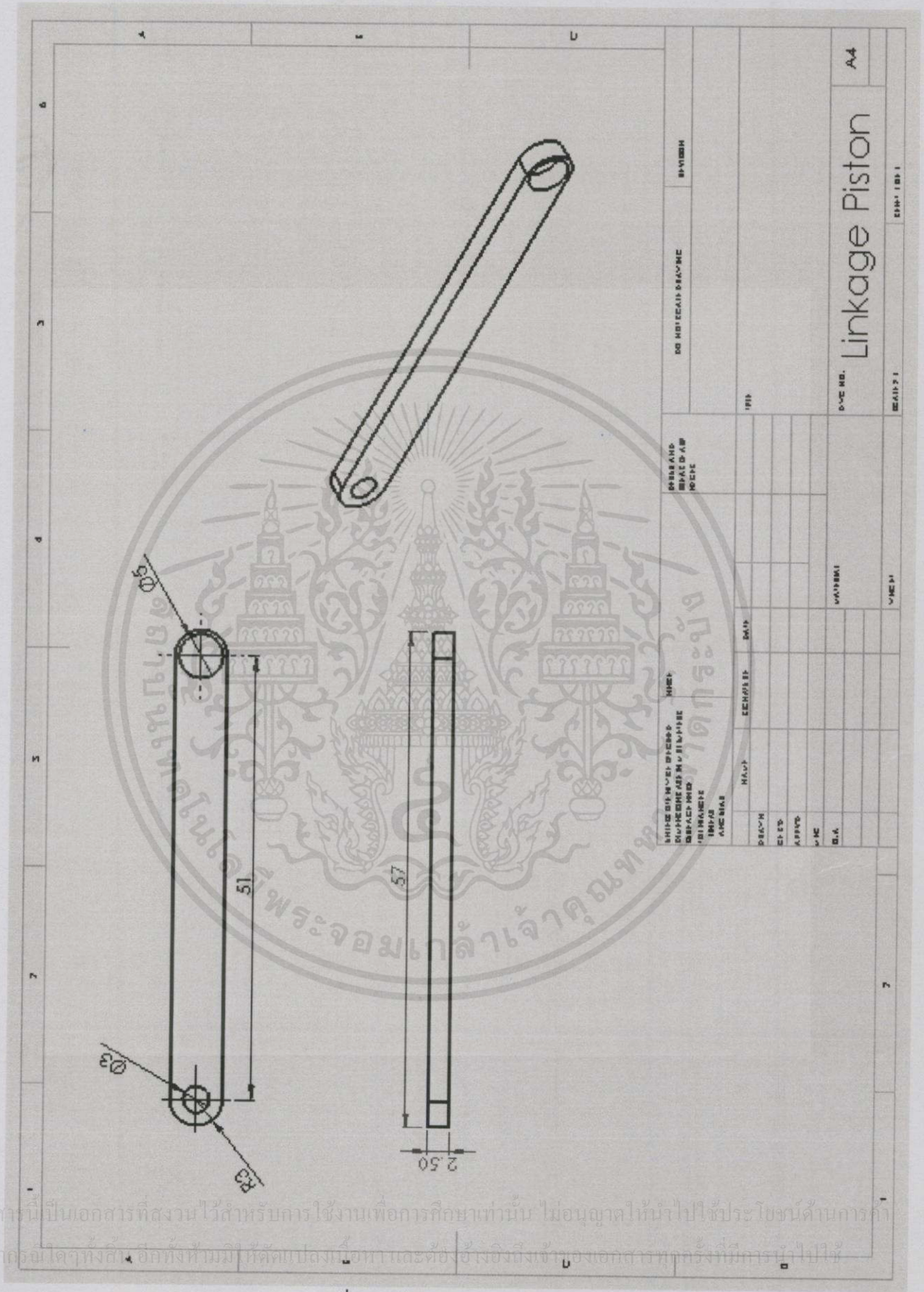
รูปที่ ก.4 ข้อเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



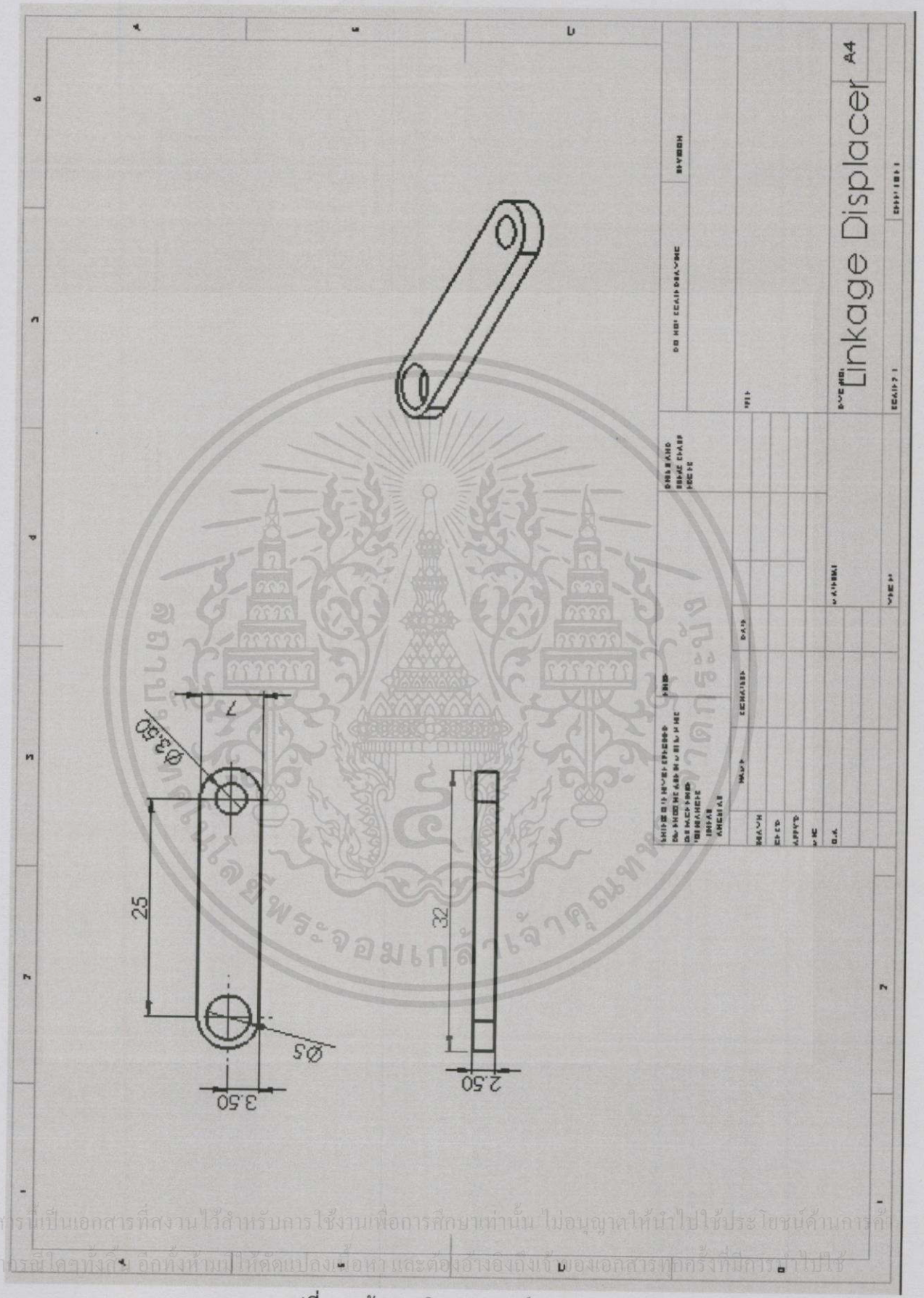
รูปที่ ก.5 ตลับลูกปืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



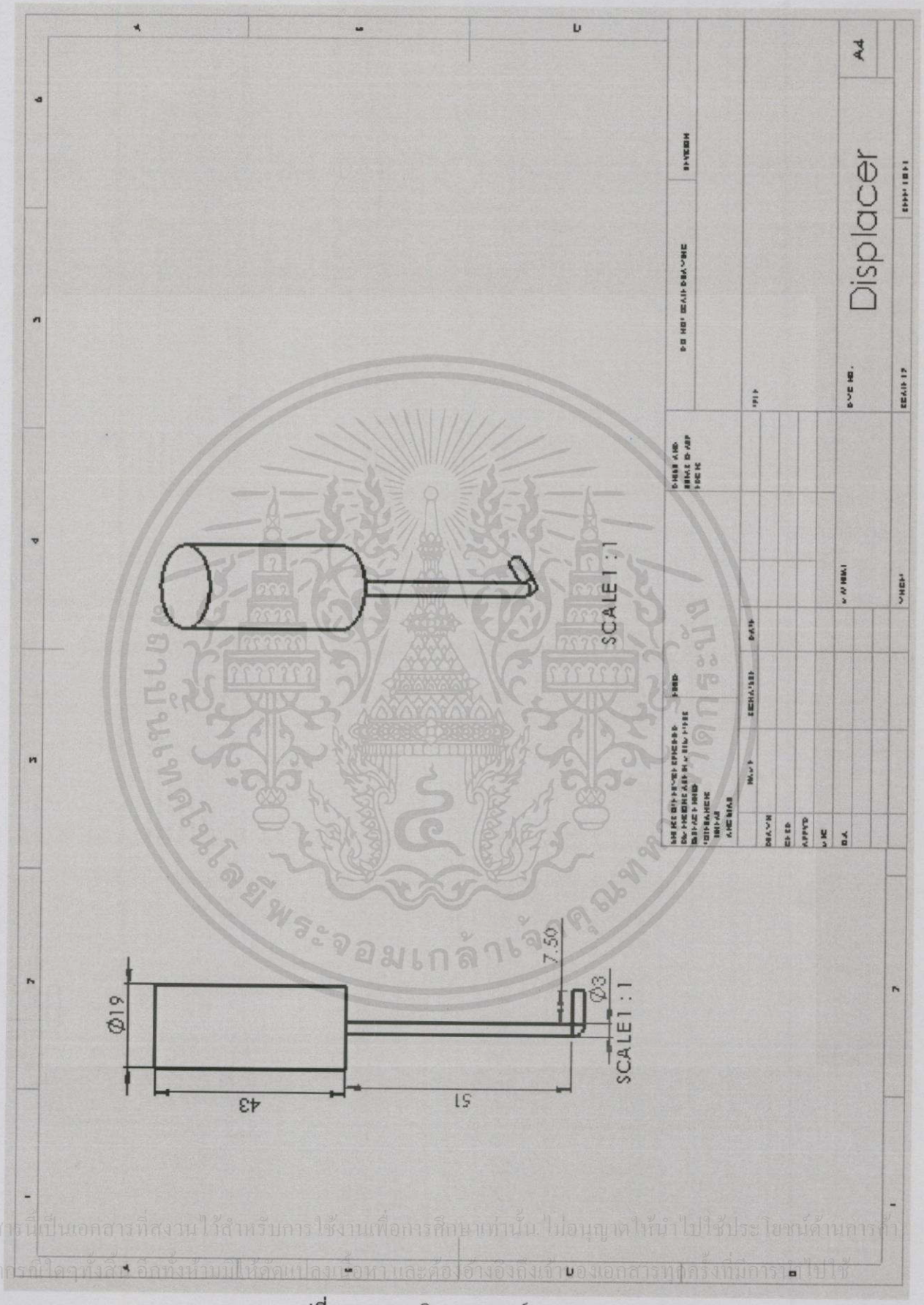
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.6 ก้านสูบกำลัง



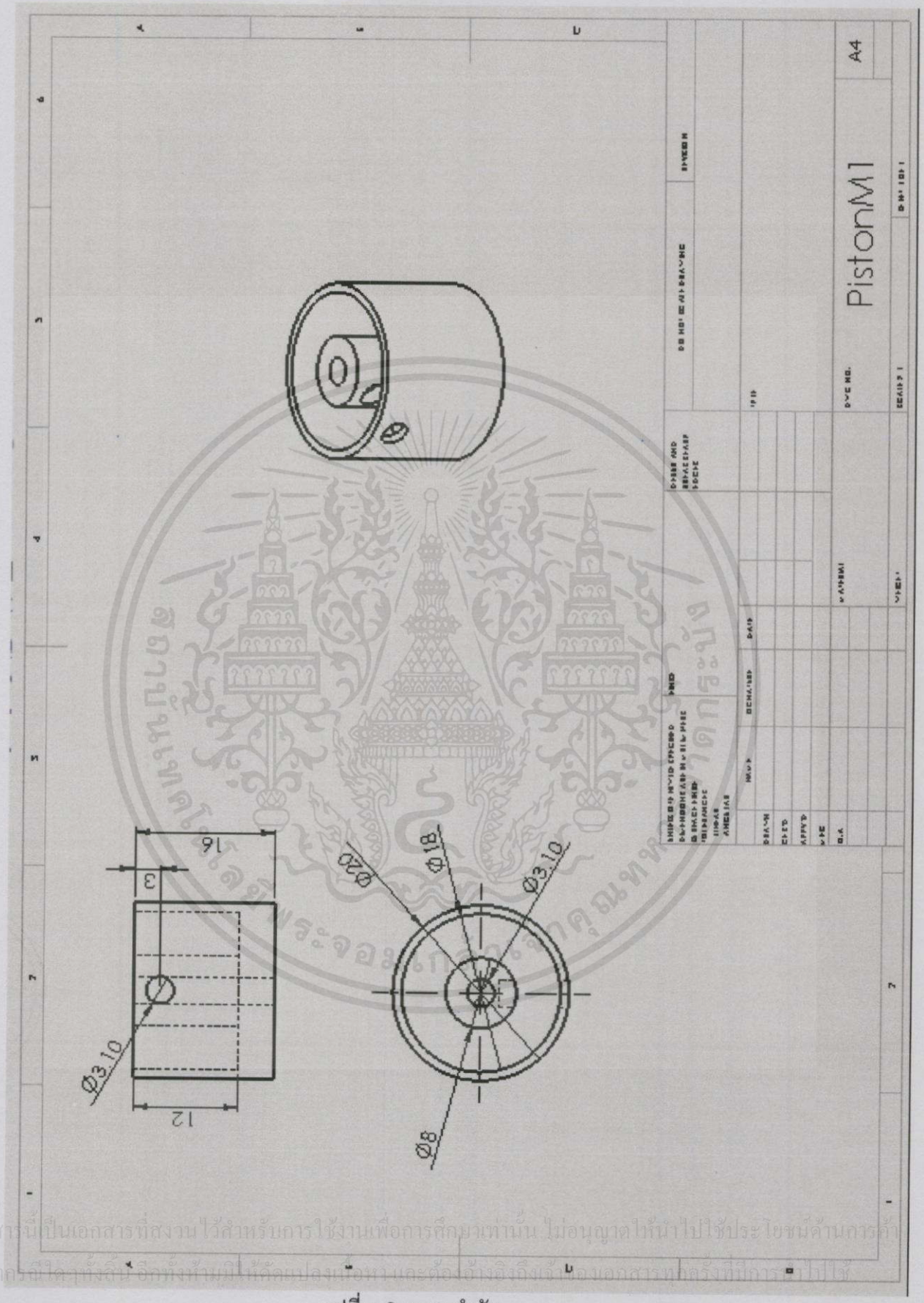
รูปที่ ก.7 ก้านสูบดิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.8 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.9 ลูกสูบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

กราฟและค่าที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ค่าที่ได้จากการทดลอง

เวลา	อุณหภูมิด้านร้อน		อุณหภูมิด้านเย็น		ความเร็วรอบ	
	1	2	1	2	1	2
0	31.8	33.5	32.2	31.3		
15	221.5	256.7				
30	333	363.7	32.2	31.4		
45	415.5	431.4				
60	466	483.9	33.2	32.6		
75	500	520				
90	535.5	545.4	36	35.5		
105	558.1	564.6				
120	559.4	578.3	39.6	38.9		
135	576	588.4				
150	565	595.5	43.5	42.5		
165	590	594.8				
180	589	598.7	46.8	47.3	339.9	329.1
195	602.7	599				
210	606.6	603.7	51.6	50.8	337.8	336.1
225	601	605.1				
240	591.7	605.4	53.7	52.8	368	333.4
255	600.9	601.1				
270	596.4	603.8	57.7	56	377.4	382.4
285						
300			60	59.3	388	391.1
315						
330			63.2	62.1	404	429.4
345						
360			66	65	411.5	434.7
375						

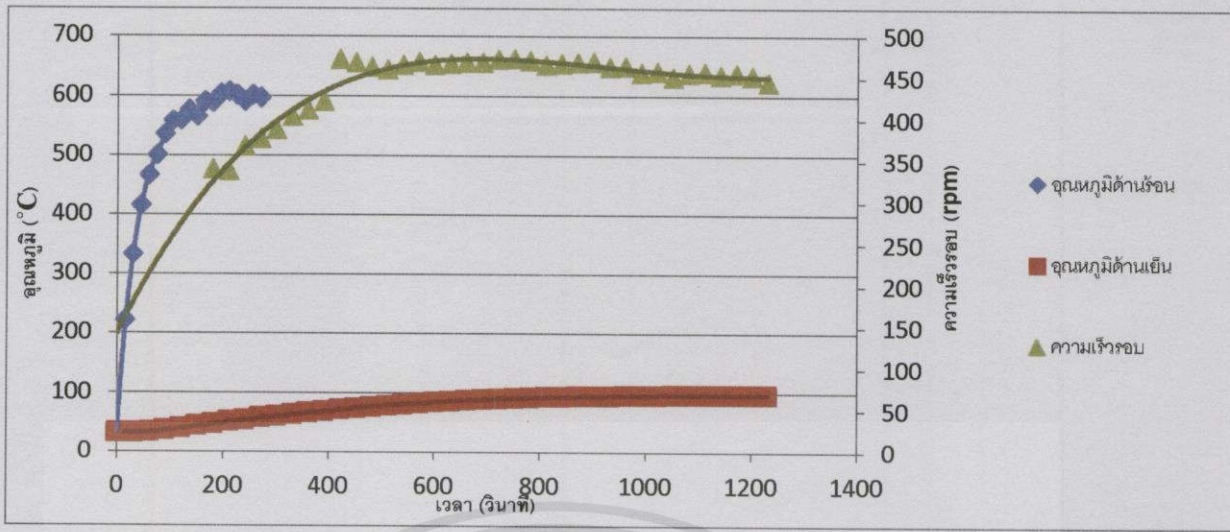
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

390			68.8	67.7	422.2	442.4
405						
420			71.4	70.3	472.3	445.7
435						
450			74.2	73	468.2	452.4
465						
480			76.5	75.4	462.8	477.4
495						
510			78.7	77.6	460	476.9
525						
540			80.8	79.6	465.3	474
555						
570			82.7	81.7	469.1	470.4
585						
600			84.5	83.4	465.2	474.7
615						
630			86.2	85.3	466.5	481.7
645						
660			87.8	86.8	468.2	479
675						
690			89.2	88.3	468.3	470.3
705						
720			90.3	89.5	472.2	477.3
735						
750			91.3	90.5	472.5	473.2
765						
780			92.2	91.4	470.3	471.6
795						
810			92.9	92.1	465.2	473.9
825						
840			93.4	92.7	467	475
855						

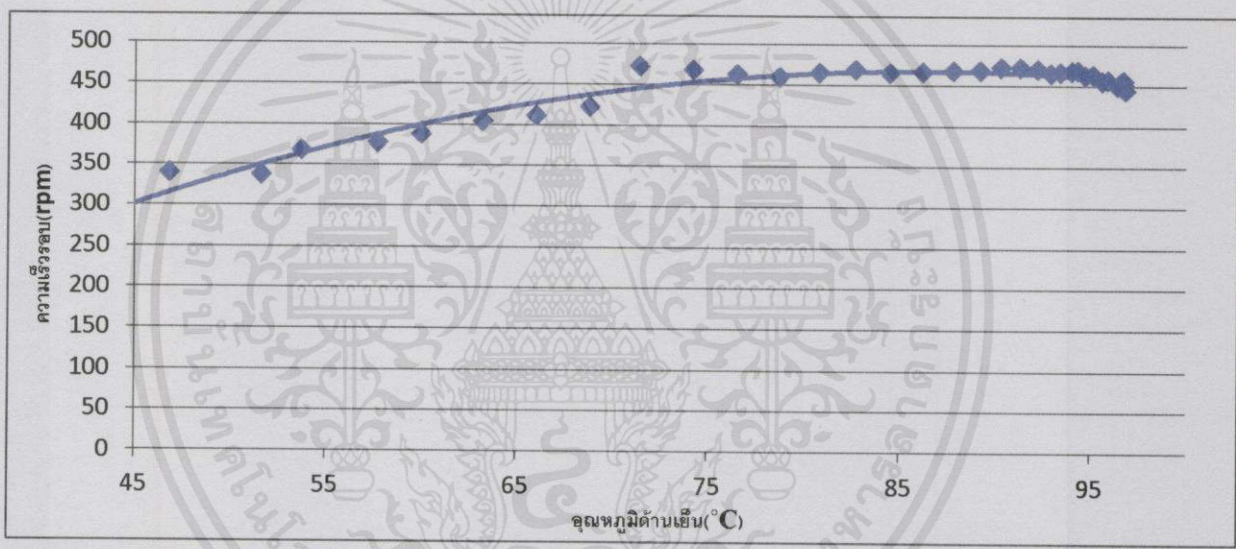
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

870			94	93.1	468.2	476.5
885						
900			94.3	93.6	468.7	473.9
915						
930			94.7	93.9	463	471.7
945						
960			95.1	94.6	463.6	460.9
975						
990			95.6	95.1	455.9	450.3
1005						
1020			95.9	95.5	457.3	467.3
1035						
1050			96.4	95.7	450.3	457.9
1065						
1080			96.6	95.8	455.4	463.6
1095						
1110			96.7	96.1	456.5	462.9
1125						
1140			96.6	96.1	452.9	462.1
1155						
1170			96.6	96.3	455.3	466.4
1185						
1200			96.7	96.4	452.4	464
1215						
1230			96.8	96.6	444.8	456.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

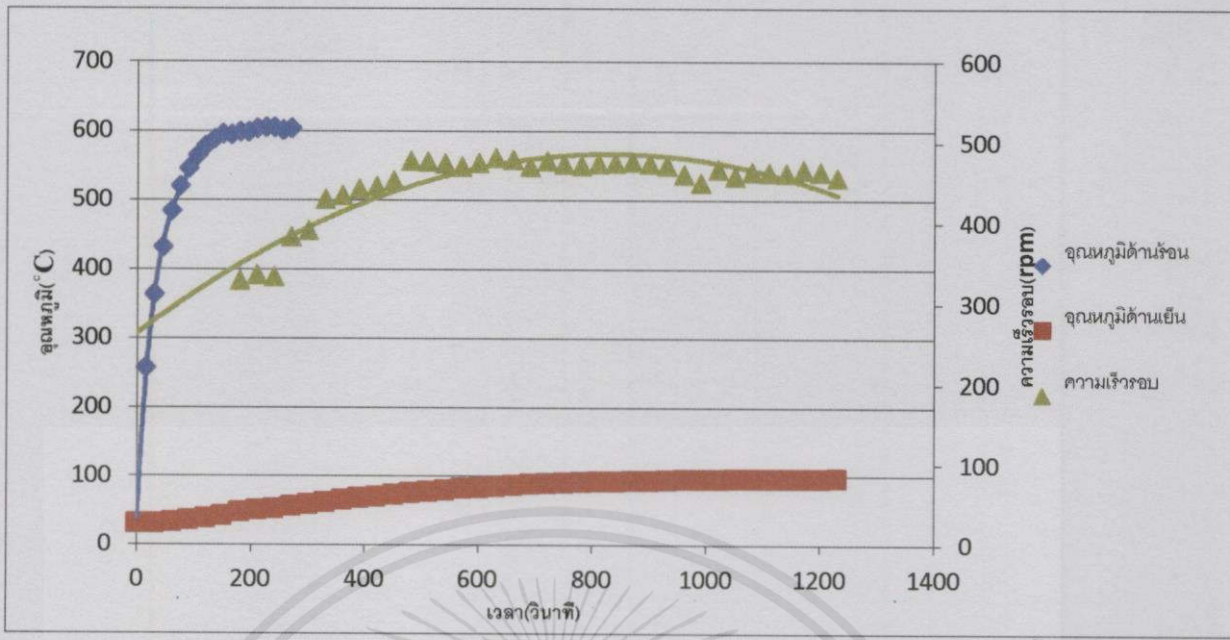


รูป ข.1 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความเร็วรอบกับเวลาของผลการทดลองครั้งที่1

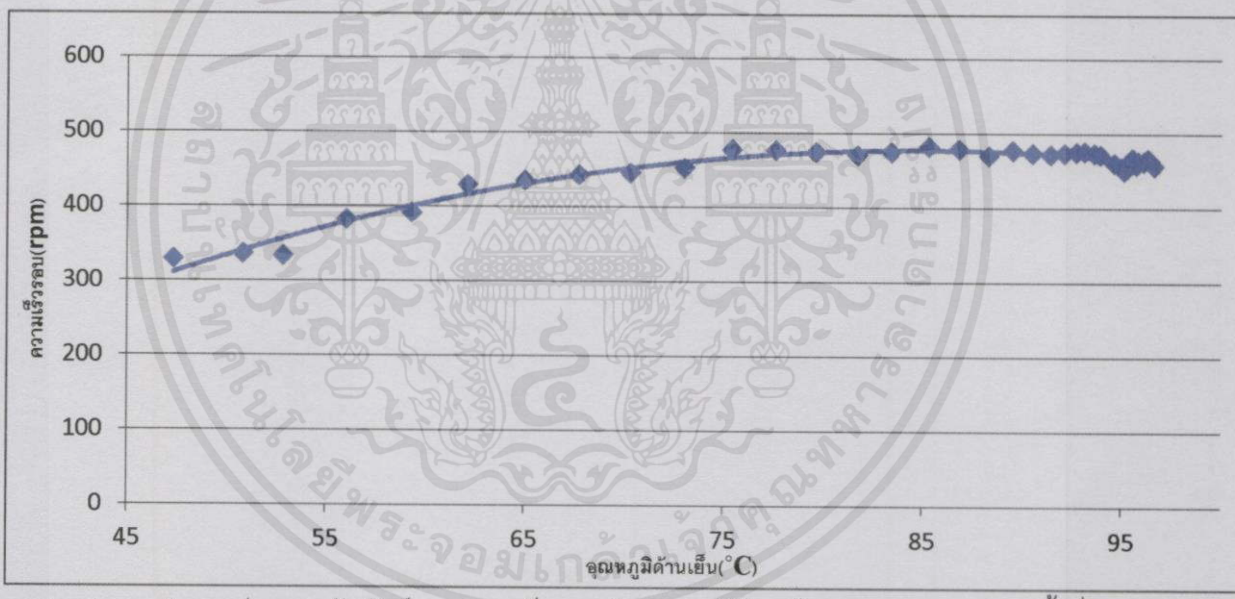


รูป ข.2 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับอุณหภูมิด้านเย็นของผลการทดลองครั้งที่1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข.3 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความเร็วรอบกับเวลาของผลการทดลองครั้งที่2



รูป ข.4 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับอุณหภูมิด้านเย็นของผลการทดลองครั้งที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

โค้ดโปรแกรม MATLAB

```
clear all
Vd = 1631.27e-9; % Dead Volume
Tc = 98+273; % Compression Temperature
Te = 600+273; % Expansion Temperature
Td = 0.5*(Tc+Te); % Dead space Temperature
A = (pi/4)*(20^2); % Area piston
b1=7; % Crank Radius Piston
b2=10.9; % Crank Radius Displacer
c1=51; % connecting rod Piston
c2=25; % connecting rod Displacer
R = 0.287; % gas constant
m =  4.722e-06; % mass
o = 0:360*3; % Crank Angle

Ye=132.26-(b2*cosd(o)+sqrt((c2^2)-(b2*sind(o)).^2)+52.5+43); %
Expansion Displacement
Yc=(-(b1*cosd(o-90)+sqrt((c1^2)-((b1*sind(o-
90)).^2))+13)+(b2*cosd(o)+52.5+sqrt((c2^2)-(b2*sind(o)).^2))); %
Compression Displacement
Ve = Ye*A*10^(-9); % Compression volume
Vc = Yc*A*10^(-9); % Expansion volume
n=((Vc/Tc)+(Ve/Te)+(Vd/Td)).^-1;
P = m*R*n; % Pressure
Vt = Ve+Vc+Vd; % total volume

figure
plot(o,Ve,'-r',o,Vc)
xlabel('Crank angle(degree)');
ylabel('Volume(m^3)');
figure
plot(o,P)
xlabel('Crank angle(degree)');
ylabel('Pressure(kPa)');

figure
plot(Vt,P,'r')
xlabel('Volume(m^3)');
ylabel('Pressure(kPa)');
grid on

Wc = trapz(Vc,P)
We = trapz(Ve,P)
W = trapz(Vt,P)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้