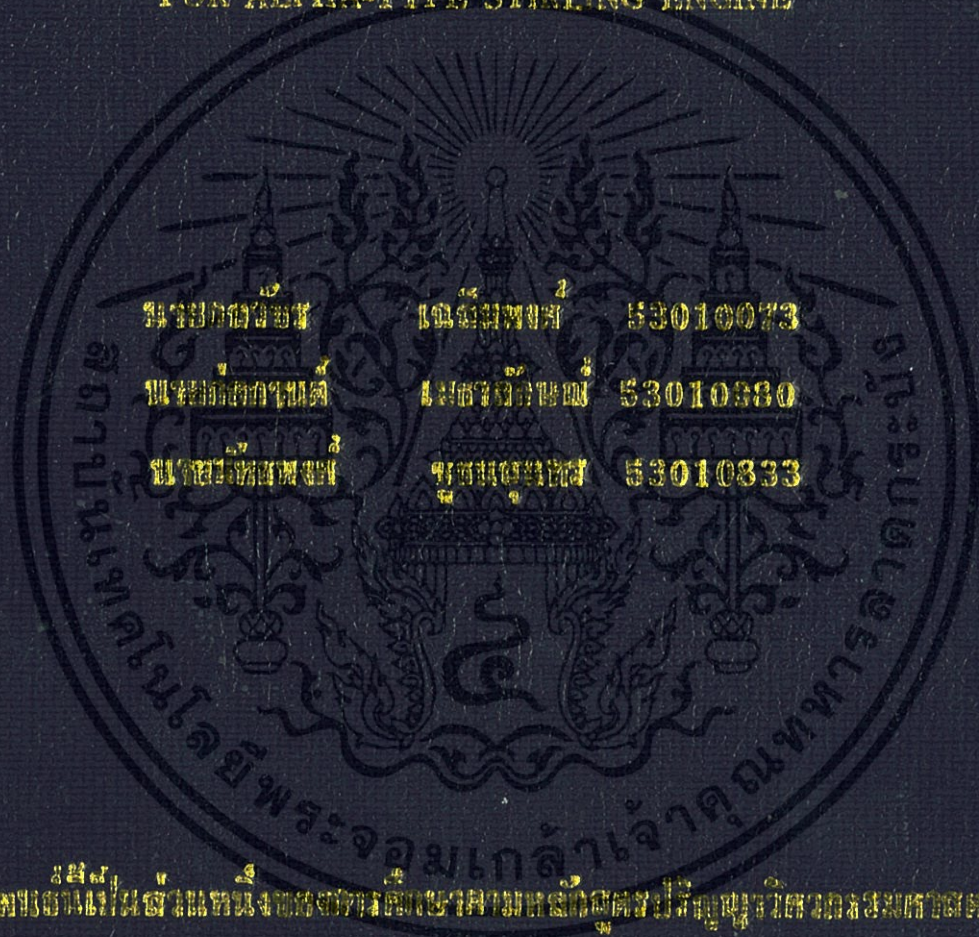


การปรับปรุงและพัฒนากลไก Ross Yoke สำหรับเครื่องยนต์
ชนิดอัลฟาแบบสูบ

MODIFICATION AND DEVELOPMENT OF ROSS-YOKE MECHANISM
FOR ALPHA-TYPE STIRLING ENGINE



นายอภิสิทธิ์

เจษฎาพงษ์

53010073

นายอภิสิทธิ์

เจษฎาพงษ์

53010380

นายอภิสิทธิ์

เจษฎาพงษ์

53010333

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การปรับปรุงและพัฒนากลไก Ross Yoke สำหรับเครื่องยนต์
สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

MODIFICATION AND DEVELOPMENT OF ROSS-YOKE MECHANISM
FOR ALPHA-TYPE STIRLING ENGINE



นายกมลวัชร	เฉลิมพงศ์	53010073
นายก่อกานต์	เมธาลักษณ์	53010080
นายนิทรพงศ์	ชูธนสุนทร	53010833

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODIFICATION AND DEVELOPMENT OF ROSS-YOKE MECHANISM FOR
ALPHA-TYPE STIRLING ENGINE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การปรับปรุงและพัฒนากลไก Ross Yoke สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

Modification and Development of Ross-Yoke Mechanism for an Alpha-type Stirling Engine

ผู้จัดทำ

1. นายกลวัชร เฉลิมพงศ์ รหัสประจำตัว 52010073

2. นายก่อกานต์ เมธาลักษณ์ รหัสประจำตัว 52010080

3. นายนัทธพงศ์ ชูธนสุนทร รหัสประจำตัว 52010833


(ผศ.ดร.สุตภัมภ์ แคว้นเขาเม็ง)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงและพัฒนากลไก Ross Yoke สำหรับเครื่องยนต์ สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

นายกฤษ	เฉลิมพงศ์	53010073
นายก่อกานต์	เมธาลักษณ์	53010080
นายณัฏพงษ์	ชุนสุนทร	53010833
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขามิ่ง	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงและพัฒนากลไก Ross Yoke เพื่อรักษาการเคลื่อนที่ของก้านสูบให้เป็นแบบเชิงเส้นในขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของก้านสูบในกลไก Ross Yoke โดยปกติจะมีการโยกจากแนวเชิงเส้นจึงส่งผลให้เกิดภาระแรงกระทำต่อกันร้าวหรือซีล (Seal) ส่งผลให้อายุการใช้งานของซีลน้อยลงและเกิดการรั่วไหลของสารทำงาน ซึ่งจะมีผลอย่างมากเมื่อนำกลไกนี้ไปใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดส่งกำลังแบบสองทิศทาง (Double Acting Stirling engine) อีกทั้งยังมีการสูญเสียกำลังจากแรงเสียดทานด้านข้าง ดังนั้นจึงนำเอาแนวคิดของกลไกแบบ Scotch Yoke มาประยุกต์เพื่อปรับปรุงกลไก Ross Yoke จากเดิมที่เป็นแบบร่องกลมมีหมุดยึดลอคตำแหน่งในร่องให้มีลักษณะร่องยึดที่ยาวเพื่อให้หมุดยึดข้อต่อเคลื่อนที่ได้ภายในร่อง ส่งผลให้กลไกสามารถรักษาให้การเคลื่อนที่ของก้านสูบเป็นแบบเชิงเส้นในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ ซึ่งกลไกนี้เหมาะกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีโครงสร้างแบบแอลฟา โดยมีสองกระบอกสูบ ซึ่งลูกสูบดีเซลเซอร์เคลื่อนที่ภายในกระบอกสูบด้านร้อนและลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ภายในกระบอกสูบด้านเย็น การวิเคราะห์วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ใช้วิธีวิเคราะห์แบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Analysis) หลักการถ่ายเทความร้อนใช้วิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องยนต์ เช่น ฮีตเตอร์, คูลเลอร์และการให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ เพื่อผลิตกำลังตามต้องการ ในการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ใช้หลักการกูดส์แมนแบบปรับปรุง (Modified Goodman Criterion) เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายและความปลอดภัยของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ต้นแบบถูกสร้างขึ้นและทำการทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งพบว่ากลไกที่ปรับปรุงใหม่

สามารถทำงานตามวัตถุประสงค์และสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี ผลการทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยใช้ชุดทดสอบแบบโรปเบรก พบว่าเครื่องยนต์มีกำลังสูงสุดที่ 0.549 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 486 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุด 0.014 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที และมีความเร็วรอบสูงสุด 977 รอบต่อนาที



Modification and Development of Ross-Yoke Mechanism for an Alpha-type Stirling Engine

Kolawach Chalermphong 53010073
Korkan Methaluk 53010080
Natthapong Chuthanasoonthorn 53010833
Assis.Prof.Dr.Sutapat Kwankaomeng Advisor

Abstract

This thesis aims to modify and develop a Ross-Yoke mechanism to maintain the position of piston rods to operate in complete linear behavior during engine runs. With non-linear position of piston rods, loads from piston will act on seals. These loads are going to reduce seal's lifetime and cause the working fluid leak out. Such effects cause problem when use in double-acting Stirling engine and also power loss from side friction effects. By applying the motion concept of the Scotch yoke mechanism, Ross yoke mechanism will be modified by replaced pinned-joints to slider joints in order to linearize the position of piston rods. The engine is Alpha-type construction. Stirling engine cycle is analyzed by isothermal analysis. Heat transfer principles are used to design heat exchangers such as heater, cooler and heat input. The modified Goodman's criterion is utilized for failure conditions and safety of factors evaluation. The prototype was built and tested for the concept proof of the modified Ross yoke mechanism. The experimental results show that the engine can be operated well with the modified mechanism. The maximum power and torque were 0.549 W and 0.014 N.m at 486 RPM and 260 RPM, respectively. The maximum speed was 977 RPM.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ก็เพราะคำแนะนำ และการช่วยเหลือในทุกๆด้าน จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง

ขอขอบพระคุณ ผศ.บรรเทิง ศิลป์สกุลสุข จากมหาวิทยาลัยสยาม ที่ช่วยให้คำแนะนำดีๆ และแนวคิดต่างๆ ใน ด้านการออกแบบ รวมไปถึงรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทในห้องทดลอง ที่คอยให้คำแนะนำ และคอยช่วยเหลือ ให้งานดำเนินไปอย่างราบรื่น

ขอขอบคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยสั่งสอนให้ความรู้ตลอดมาจนกระทั่งปริญญาานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จ

และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำตลอดมา ซึ่งข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณ และขอกราบขอบพระคุณทุกท่านมา ณ ที่นี้

นายกลวัชร เฉลิมพงศ์

นายก่อกานต์ เมธาลักษณ์

นายนัทพงศ์ ชูธนสุนทร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	1
1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์	6
2.1 วัฏจักรคาร์โนลต์	6
2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิงค์	6
2.3 รูปแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์	9
2.3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์แบบกลไกกลศาสตร์	10
2.3.1.1 เครื่องยนต์แบบส่งกำลัง1ทิศทาง	10
2.3.1.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแกรมม่า	10
2.3.1.1.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดเบต้า	10

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1.1.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟา	11
2.3.1.2 เครื่องยนต์แบบส่งกำลัง 2 ทิศทาง	11
2.3.1.3 กลไกที่นิยมใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ประเภทต่างๆในปัจจุบัน	12
2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์แบบลูกสูบอิสระ	14
2.4 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟา	15
บทที่ 3 แนวคิดและการออกแบบการปรับปรุงกลไก Ross Yoke	17
3.1 แนวคิดสำหรับการปรับปรุงกลไก	17
3.2 การออกแบบการปรับปรุงกลไก	19
บทที่ 4 การออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบ	21
4.1 สมมติฐานสำหรับการคำนวณในการออกแบบ	21
4.2 การออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน	21
4.2.1 โดมรับความร้อน	21
4.2.2 ส่วนระบายความร้อน	25
4.2.3 กระจับอกสูบ	28
4.3 การออกแบบชิ้นส่วนกลไก	28
4.3.1 ก้านสูบ	30
4.3.1.1 ก้านสูบส่วนบน	30
4.3.1.2 ก้านสูบส่วนล่าง	31
4.3.2 สตั๊ด	32
4.3.3 เฟลา	34
4.3.4 รอสยอร์ค	35

สารบัญ(ต่อ)

4.3.5 ล้อช่วยแรง	36
บทที่ 5 การวิเคราะห์หัวข้อจักรของเครื่องยนต์	39
5.1 สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์	39
5.2 รายละเอียดของเครื่องต้นแบบ	39
5.3 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลไก	40
5.4 การวิเคราะห์แบบอณุมิติคงที่	41
บทที่ 6 ส่วนประกอบและเครื่องยนต์ต้นแบบ	45
6.1 โดมรับความร้อน	45
6.2 ส่วนระบายความร้อน	45
6.3 กระจบอกลูกสูบขยายตัว	46
6.4 กระจบอกลูกสูบ	47
6.5 ลูกสูบขยายตัว	47
6.6 ลูกสูบอัดตัว	48
6.7 ก้านสูบ	48
6.8 ชิ้นส่วนรอสยอร์คแบบปรับปรุง	49
6.9 ก้านร็อคเกอร์	49
6.10 เพลาข้อเหวี่ยง	50
6.11 ล้อช่วยแรง	50
6.12 กล่องห้องเครื่อง	50
6.13 เครื่องยนต์ต้นแบบ	51
บทที่ 7 สมรรถนะของเครื่องยนต์	53
7.1 การทดสอบสมรรถนะ	53
7.1.1 วิธีการทดสอบ	54
7.1.2 หลักการคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์	54

สารบัญ(ต่อ)

7.2 ผลการทดสอบ	55
7.3 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ	56
บทที่ 8 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	57
8.1 สรุป	57
8.2 ข้อเสนอแนะ	57
บรรณานุกรม	58
ภาคผนวก	59



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 รายละเอียดของเครื่องยนต์	39
5.2 ตารางแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณวัฏจักรของเครื่องยนต์	44
7.1 ตารางบันทึกผลการทดสอบเครื่องยนต์	55
ก.1 ตารางแสดงชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ต้นแบบ	60



สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	5
2.1 แผนภาพP-v และ T-s ของวัฏจักรคาร์โนลต์	6
2.2 ภาพแสดงลักษณะของลูกสูบในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรสเตอร์ลิงค์	9
2.3 กราฟแผนภาพ P-v และ T-s ของวัฏจักรสเตอร์ลิงค์	9
2.4 ภาพแสดงลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแกรมม่า	10
2.5 ภาพแสดงลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดเบต้า	10
2.6 ภาพแสดงลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟา	11
2.7 ภาพแสดงลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดส่งกำลัง2ทิศทาง	12
2.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์แอลฟาแบบตัววี	12
2.9 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์เบต้ากลไกโรมบิก	13
2.10 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์กลไกโรสยอร์ก	13
2.11 กลไกวออบเบิลเพลต	14
2.12 กลไกสวอชเพลต	14
2.13 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดลูกสูบอิสระ	14
2.14 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 1-2	15
2.15 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 2-3	15
2.16 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 3-4	16
2.17 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 4-1	16
3.1 ตำแหน่งของกลไกและลูกสูบที่ตำแหน่งเพลลา 0 องศา	17
3.2 ตำแหน่งของกลไกและลูกสูบที่ตำแหน่งเพลลา 90 องศา	18
3.3 ตำแหน่งของกลไกและลูกสูบที่ตำแหน่งเพลลา 180 องศา	18
3.4 ตำแหน่งของกลไกและลูกสูบที่ตำแหน่งเพลลา 270 องศา	19
3.5 ชิ้นส่วนรอสยอร์กแบบปรับปรุง	19
3.6 ชิ้นส่วนรอสยอร์กแบบปรับปรุงเมื่อติดตั้งแบริงเป็นข้อต่อแบบเคลื่อนได้	19

สารบัญรูป(ต่อ)

3.7	ชิ้นส่วนรอยอร์คแบบปรับปรุงเมื่อติดตั้งแบร็งและก้านสูบ	20
4.1	ภาพแสดงลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนของโดมรับความร้อน	21
4.2	วงจรความร้อนของโดมรับความร้อน	21
4.3	ภาพแสดงลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนของชิ้นส่วนระบายความร้อน	25
4.4	วงจรความร้อนของชิ้นส่วนระบายความร้อน	25
4.5	ภาพแสดงตัวอย่างของครีบริบควาร์ร้อน	26
4.6	ก้านสูบส่วนบน	30
4.7	ก้านสูบส่วนล่าง	31
4.8	สตัต	33
4.9	เพลลา	34
4.10	รอยอร์ค	35
4.11	ล้อช่วยแรง	37
5.1	แผนภาพแสดงกลไกรอยอร์ค	40
5.2	โค้ดMATLabสำหรับการวิเคราะห์วิภูจักร	43
5.3	กราฟแสดงความเคลื่อนที่ของลูกสูบขยายตัวและลูกสูบอัดตัวเทียบกับมุมของเพลลาข้อเหวี่ยง	43
5.4	กราฟความดันของเครื่องยนต์เทียบกับองศาของเพลลาข้อเหวี่ยง	44
5.5	แผนภาพความดันกับปริมาตรของเครื่องยนต์	44
6.1	โดมรับความร้อน	45
6.2	ส่วนระบายความร้อน(ด้านหน้า)	45
6.3	ส่วนระบายความร้อน(ด้านหลัง)	46
6.4	แผ่นปิดส่วนระบายความร้อน	46
6.5	กระบอกสูบขยายตัว	47
6.6	กระบอกสูบ	47
6.7	ดิสเพลสเซอร์	48
6.8	ลูกสูบขยายตัว	48
6.9	ลูกสูบอัดตัว	48

สารบัญรูป(ต่อ)

6.10	ก้านสูบ	49
6.11	ชิ้นส่วนรอยอร์คแบบปรับปรุง	49
6.12	ก้านร็อคเกอร์	49
6.13	เพลลาข้อเหวี่ยง	50
6.14	ล้อช่วยแรง	50
6.15	กล่องห้องกลไก	51
6.16	ภาพแสดงตัวอย่างการประกอบกลไก	51
6.17	เครื่องยนต์ต้นแบบ	52
7.1	ชุดทดสอบแบบโรปเบรก	53
7.2	กราฟแสดงสมรรถนะของเครื่องยนต์	56
ก.1	กล่อง1	61
ก.2	กล่อง2	62
ก.3	กล่อง3	63
ก.4	กล่อง4	64
ก.5	กล่อง5	65
ก.6	ลูกสูบอัดตัว	66
ก.7	ส่วนระบายความร้อน	67
ก.8	แผ่นปิดส่วนระบายความร้อน	68
ก.9	เพลลาข้อเหวี่ยง	69
ก.10	ฐานกระบอกสูบขยายตัว	70
ก.11	กระบอกสูบขยายตัว,อัดตัว	71
ก.12	ลูกสูบขยายตัว	72
ก.13	ตัวเชื่อมกระบอกสูบขยายตัว	73
ก.14	ดิสเพลสเซอร์	74
ก.15	ล้อช่วยแรง	75

สารบัญญรูป(ต่อ)

ก.16 โดมรับความร้อน	76
ก.17 ก้านสุบฝั่งอัตรตัว	77
ก.18 ก้านสุบฝั่งขยายตัว	78
ก.19 ตัวยึดก้านลือกเกอร์	79
ก.20 ก้านลือกเกอร์	80
ก.21 รอสยอร์คแบบปรับปรุง	81
ก.22 สตัด	82



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันที่พลังงานเชื้อเพลิงจากซากฟอสซิลกำลังขาดแคลนและมีราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังก่อให้เกิดมลพิษและทำลายสภาพแวดล้อม เครื่องยนต์สเตอร์ลิงซึ่งถูกคิดค้นโดยโรเบิร์ตสเตอร์ลิงในปีค.ศ. 1816 นั้นเป็นเครื่องยนต์ที่ทำงานโดยอาศัยแหล่งความร้อนจากภายนอก ไม่จำเป็นต้องมีการจุดระเบิด จึงสามารถที่จะใช้แหล่งพลังงานงานที่สะอาด เช่น แสงอาทิตย์หรือเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีมลพิษน้อย จึงเป็นเครื่องยนต์ที่เหมาะสมที่จะรับมือกับเหตุการณ์ในปัจจุบัน อีกทั้งในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีผลผลิตที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้อย่างหลากหลาย ผู้ศึกษาจึงต้องการที่จะศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เพื่อที่จะเป็นประโยชน์ในการศึกษาและพัฒนา องค์ความรู้และเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนและพลังงานสะอาดต่อไป

1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟ้านั้น เป็นเครื่องยนต์ที่มีลักษณะส่วนประกอบของกลไกที่ไม่ซับซ้อน โดยจะเป็นเครื่องยนต์ลักษณะ 2 ลูกสูบอยู่แยกกัน เช่นเดียวกับชนิดแกมมา แต่เครื่องยนต์แอลฟ้านั้นจะมีอัตราส่วนการอัดเท่ากับเครื่องยนต์ชนิดเบต้า เมื่อพิจารณาที่ความต่างเฟส 90 องศาเท่ากัน [1] จากการศึกษาพบว่าความต่างเฟสที่เหมาะสมของเครื่องยนต์แอลฟ้านั้นคือ 80 องศา ในขณะที่เครื่องยนต์เบต้าคือ 30 องศา เมื่อเปรียบเทียบที่เฟสที่เหมาะสมนั้นเครื่องยนต์เบต้าจะให้กำลังสูงที่สุดมากกว่าแอลฟา แต่ทว่าผลของการต่างเฟสยิ่งน้อยนั้นส่งผลให้เครื่องยนต์ต้องการอัตราการให้ความร้อนมาก โดยในการออกแบบโดยทั่วไปจึงมักอ้างอิงที่ความต่างเฟส 90 องศา และเมื่อพิจารณาที่เฟสนี้เครื่องยนต์แอลฟาจะมีกำลังสูงกว่าเครื่องยนต์เบต้ามาก แต่ว่าเครื่องยนต์แอลฟาจะจำกัดค่าที่น้อยที่สุดของความต่างของอุณหภูมิ ระหว่างส่วนร้อนและเย็นเพื่อให้เครื่องยนต์ทำงาน ซึ่งค่านี้จะขึ้นกับความต่างเฟส และประสิทธิภาพทางกลของระบบ [2, 3] เครื่องยนต์แอลฟ้านั้นยังสามารถเพิ่มจำนวนลูกสูบเพื่อให้ได้กำลังที่มากขึ้น ซึ่งเป็นการพัฒนาไปเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดส่งกำลังแบบสองทิศทาง

กลไกRoss Yokeเป็นกลไกที่คิดค้นโดย นายแอนดรูว์ รอส ซึ่งออกแบบมาสำหรับระบบส่งกำลัง และขับเคลื่อนของเครื่องยนต์ชนิดแอลฟา โดยออกแบบเพื่อให้กระบอกสูบด้านขยายตัวและด้านอัดตัวสามารถตั้งคู่ขนานกันได้ เพื่อลดระยะทางวิ่งสลับกันของสารทำงานและช่วยลดแรงต้านข้างของลูกสูบได้ เนื่องจากเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขณะทำงานก้านสูบจะรักษาตำแหน่งได้ใกล้เคียงความเป็นเส้นตรงมาก อีกทั้งยังสามารถที่จะออกแบบเครื่องยนต์ให้มีขนาดเล็กได้เนื่องจากกระบอกสูบที่ตั้งขนานกัน จากการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์แอลฟาขนาด 35 ลบ.ซม. ซึ่งใช้กลไกRoss Yokeกับเครื่องยนต์เบต้าขนาด 65 ลบ.ซม. ซึ่งใช้กลไกRombric ผลที่ได้คือเครื่องยนต์แอลฟาที่ใช้กลไกRoss Yoke สามารถสร้างกำลังได้ 44.1 วัตต์ เทียบเท่ากับเครื่องยนต์เบต้าเมื่อพิจารณาที่ความดันเฉลี่ยเดียวกัน[4] และกลไกRoss Yokeเองได้ถูกนำไปประยุกต์เพื่อใช้กับเครื่องยนต์แอลฟาประเภทส่งกำลังแบบสองทิศทาง เครื่องยนต์จะมีลูกสูบ4ลูกสูบโดยมีชิ้นส่วนRoss Yokeติดตั้งเพื่อขับเคลื่อน 2 ชิ้น[5]

ผู้ศึกษาได้สังเกตว่าเนื่องจากขณะเครื่องยนต์ทำงานและลูกสูบเคลื่อนที่ตำแหน่งของก้านสูบในกลไกนี้ยังไม่เป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์ จึงมีผลให้การส่งกำลังมายังเพลายังไม่เต็มที่และมีแรงกระทำลงที่กันร้วมากกว่าการที่เป็นเส้นตรง อาจส่งผลให้อายุการใช้งานของกันร้วน้อยลงและเกิดการร้วของสารทำงานได้ โดยจากการอ้างอิงเครื่องยนต์ที่ใช้กลไกSwash Plate ที่ก้านสูบมีการตั้งเพื่อให้เคลื่อนที่ได้เป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์นั้น ภาระที่กันร้วต้องรับจะไปตกที่แบริงซึ่งต่อกับก้านสูบ[1]จากการศึกษาของบริษัทเจเนรัลมอเตอร์(General Motor)พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกลไกSwash PlateกับWobble Plate กลไกSwash Plateจะมีข้อได้เปรียบคือเครื่องยนต์เงียบและใช้สารหล่อลื่นน้อยกว่า, ตัวเครื่องมีความแข็งแรงและมีความสมดุลมากกว่า จึงไม่จำเป็นต้องเสริมน้ำหนัก[6]

ผู้ศึกษาต้องการที่จะศึกษาเพื่อพัฒนากลไกแบบRoss Yokeเพื่อให้สามารถที่จะรักษาตำแหน่งของก้านสูบได้เป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์ เทียบเท่ากับกลไกแบบSwash Plate ซึ่งจากการศึกษาเพิ่มเติมจึงได้พบกับกลไกScotch Yoke ซึ่งเป็นอีกกลไกหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์เช่นเดียวกัน[7] ซึ่งกลไกนี้สามารถที่จะรักษาการเคลื่อนที่ของลูกสูบให้เป็นเส้นตรงได้ในขณะที่เพลาส่งกำลังหมุนไป จึงนำแนวคิดของกลไกนี้มาทำการประยุกต์ใช้กับกลไกRoss Yokeสำหรับเครื่องยนต์ชนิดแอลฟา โดยการศึกษาจะทำการปรุงกลไกและทดสอบกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบ 2 ลูกสูบ เพื่อเป็นเครื่องยนต์ต้นแบบในการพัฒนาเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ส่งกำลัง2ทิศทางต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1 เพื่อศึกษาและออกแบบการปรับปรุงกลไกRoss Yokeสำหรับส่งกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาให้สามารถรักษาการเคลื่อนที่ของก้านสูบให้เป็นเส้นตรงได้
- 2 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบ2ลูกสูบ
- 3 เพื่อศึกษาวัฏจักรและการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟา

4 เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลัง 2 ทิศทางต่อไป

1.4 ข้อสมมติฐานของการศึกษา

เครื่องยนต์สามารถสร้างกำลังได้ 44 วัตต์ ตามเครื่องต้นแบบของ Ross โดยลูกสูบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 38.6 มิลลิเมตร และมีระยะกระจัดของลูกสูบเท่ากับ 21.4 มิลลิเมตร โดยอากาศเริ่มต้นมีความดัน 1 บรรยากาศ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

- 1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา 2 ลูกสูบ
- 2 กลไกโรสยอร์ค
- 3 ใช้อากาศที่ความดันบรรยากาศเป็นสารทำงานที่ความดัน 1 บรรยากาศ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 สามารถใช้ความรู้และประสบการณ์ที่ได้เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต่อไป
- 2 ได้กลไกที่สามารถทดแทนโรสยอร์คแบบดั้งเดิมเพื่อที่จะเป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อในเครื่องยนต์ประเภทส่งกำลัง 2 ทิศทาง
- 3 เครื่องยนต์ต้นแบบที่สร้างขึ้นจะสามารถเป็นแบบในการศึกษาเพื่อพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาต่อไปได้
- 4 เป็นต้นแบบในการศึกษาเพื่อพัฒนาเครื่องยนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลต่อไปได้

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

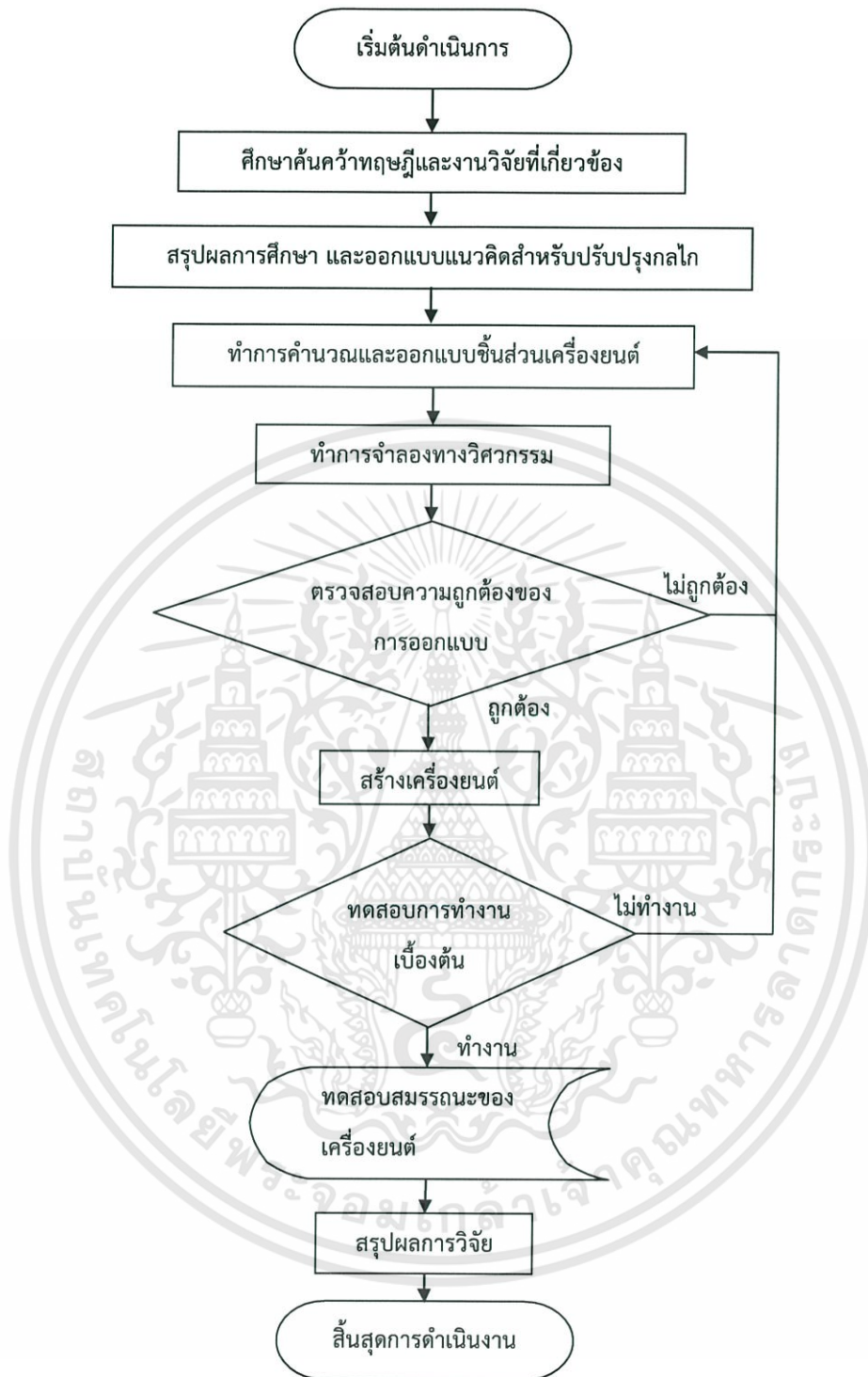
- 1 ศึกษาการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของวัฏจักรและเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรวมถึงลักษณะการเคลื่อนที่และการส่งกำลังของกลไกส่งกำลังในเครื่องยนต์จากหนังสือและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงแหล่งข้อมูลอื่นๆ
- 2 ทำการสรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาและออกแบบแนวคิดสำหรับการสร้างกลไกลักษณะใหม่รวมถึงความเป็นไปได้ในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3 ออกแบบชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์โดยอ้างอิงจากเครื่องต้นแบบของรอส ทำการคำนวณทางความร้อนและทางกลเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมกับการทำงาน
- 4 นำเครื่องยนต์ที่ออกแบบมาทำการจำลองทางวิศวกรรม
- 5 ตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบเครื่องยนต์
(หากยังไม่ถูกต้องให้กลับไปขั้นตอนที่ 1.6.3)
- 6 ทำการสร้างเครื่องยนต์
- 7 ทำการทดสอบเบื้องต้นว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้
(หากเครื่องยนต์ไม่ทำงานให้กลับไปขั้นตอนที่ 1.6.3)
- 8 ทำการทดสอบเครื่องยนต์และบันทึกค่า
- 9 สรุปผลการทดสอบ
- 10 สิ้นสุดการดำเนินงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

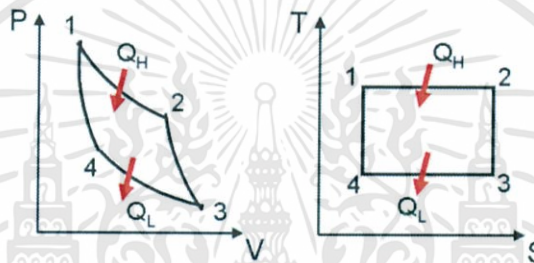
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์

2.1 วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot Cycle)

วัฏจักรคาร์โนต์ คือวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกแบบอุดมคติ ซึ่งวัฏจักรคาร์โนต์นั้นเป็นวัฏจักรที่ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด โดยวัฏจักรคาร์โนต์นั้นจะประกอบด้วยกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิก 4 ขั้นตอนคือ 2 กระบวนการอุณหภูมิคงที่ และ 2 กระบวนการเอนโทรปีคงที่ ซึ่งได้แสดงภาพภาพขั้นตอนการดำเนินวัฏจักรไว้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพ P-v และ T-s ของวัฏจักรคาร์โนต์

แต่ทว่าในการใช้งานจริงนั้นเราไม่สามารถที่จะสร้างเครื่องยนต์ที่ทำงานบนวัฏจักรคาร์โนต์ได้ เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะควบคุมไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในระบบ และสร้างระบบแบบย้อนกลับได้เพื่อให้เกิดกระบวนการเอนโทรปีคงที่ ต่อมาจึงมีการนำแนวคิดของวัฏจักรนี้มาประยุกต์เพื่อให้เกิดความเป็นไปได้ในการใช้งานมากขึ้น

2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิงค์ (Stirling Cycle)

จากการนำแนวคิดของวัฏจักรคาร์โนต์มาใช้จึงได้เกิดวัฏจักรสเตอร์ลิงค์ขึ้น โดยวัฏจักรสเตอร์ลิงนั้นเป็นการลอกเลียนแบบจากวัฏจักรคาร์โนต์ โดยสิ่งที่แตกต่างคือเปลี่ยนจากกระบวนการเอนโทรปีคงที่เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่แทนทำให้วัฏจักรนี้ประกอบด้วยกระบวนการเทอร์โมไดนามิก 4 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1-2 กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal compression)

ในขั้นตอนนี้ความร้อนจะถูกดึงออกจากสารทำงานและระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยที่อุณหภูมิในขั้นตอนนี้จะเป็นอุณหภูมิต่ำสุดของวัฏจักรและลูกสูบจะอัดสารทำงานให้มีความดันสูงขึ้น โดยงานที่ใช้ในการอัดนั้นจะเท่ากับความร้อนที่ระบายออกจากระบบทำให้กระบวนการนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในแต่มีการลดลงของเอนโทรปี โดยมีสมการสำหรับระบุสถานะของกระบวนการดังนี้

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} \quad (2.1)$$

$$Q_{out} = W_c = P_1 V_1 \ln(1/r) = RT_1 \ln(1/r) \quad (2.2)$$

$$S_2 - S_1 = R \ln(1/r) \quad (2.3)$$

เมื่อ	T_1 และ T_2	คืออุณหภูมิของสารทำงาน ณ สถานะที่ 1 และ 2 โดยที่ $T_1 = T_2 = T_{min}$
	P_1 และ P_2	คือความดันของสารทำงาน ณ สถานะที่ 1 และ 2
	V_1 และ V_2	คือปริมาตรของสารทำงาน ณ สถานะที่ 1 และ 2
	r	คืออัตราส่วนการอัด โดยที่ $r = V_1/V_2$
	Q_{out}	คือความร้อนที่ระบายออกจากระบบ
	W_c	คืองานที่ใช้ในการอัด
	S_1 และ S_2	คือเอนโทรปี ณ สถานะที่ 1 และ 2

ขั้นตอนที่ 2-3 กระบวนการรับความร้อนแบบปริมาตรคงที่ (Constant-volume heat addition)
 ณ ขั้นตอนนี้สารทำงานจะเคลื่อนตัวจากส่วนเย็นเพื่อไปรับความร้อนโดยที่สถานะจะเลื่อนจากจุด 2 ไป 3 จะมีความดันและอุณหภูมิสูงสุดของระบบ โดยกระบวนการนี้จะมีพลังงานภายในและเอนโทรปีเพิ่มขึ้นโดยที่ไม่มีการสร้างงานเกิดขึ้น

$$P_3 = \frac{P_2 T_3}{T_2} \quad (2.4)$$

$$Q_{in} = C_v (T_3 - T_2) \quad (2.5)$$

$$S_3 - S_2 = C_v \ln(T_3/T_2) \quad (2.6)$$

เมื่อ	T_3	คืออุณหภูมิของสารทำงาน ณ สถานะที่ 3 โดยที่ $T_3 = T_{max}$
	P_3	คือความดันของสารทำงาน ณ สถานะที่ 3 โดยที่ $P_3 = P_{max}$
	V_3	คือปริมาตรของสารทำงาน ณ สถานะที่ 3 โดยที่ $V_2 = V_3$
	Q_h	คือความร้อนที่ป้อนในส่วนรับความร้อน
	S_3	คือเอนโทรปี ณ สถานะที่ 3

ขั้นตอนที่ 3-4 กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิกคงที่ (Isothermal expansion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนนี้ความร้อนจะถูกป้อนให้กับกระบอกสูบขยายตัว เมื่อสารทำงานรับความร้อนก็จะขยายตัวดันลูกสูบออกและได้งานออกมาจากระบบโดยที่อุณหภูมิคงที่เนื่องจากความร้อนทั้งหมดที่ให้ถูกเปลี่ยนเป็นงานในการขยายตัว

$$P_4 = \frac{P_3 V_3}{V_4} \quad (2.7)$$

$$Q_e = W_e = P_3 V_3 \ln(r) = RT_3 \ln(r) \quad (2.8)$$

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

เมื่อ	T_4	คืออุณหภูมิของสารทำงาน ณ สถานะที่ 4 โดยที่ $T_3 = T_4 = T_{max}$
	P_4	คือความดันของสารทำงาน ณ สถานะที่ 4
	V_4	คือปริมาตรของสารทำงาน ณ สถานะที่ 4
	r	คืออัตราส่วนการอัด โดยที่ $r = V_4/V_3$
	Q_e	คือความร้อนที่ระบายออกจากระบบ
	W_e	คืองานที่ได้จากการขยายตัว
	S_4	คือเอนโทรปี ณ สถานะที่ 4

ขั้นตอนที่ 4-1 กระบวนการคายความร้อนแบบปริมาตรคงที่

หลังจากที่สารทำงานขยายตัวแล้วจะถูกลูกสูบดันให้ไหลกลับไปสู่กระบอกสูบอัดตัว ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการระบายความร้อนออกส่วนหนึ่งก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการอัดตัว โดยจะการระบายความร้อนนี้จะเป็นเพียงการลดพลังงานภายในของระบบลงโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

$$P_1 = \frac{P_4 T_1}{T_4} \quad (2.10)$$

$$Q_k = C_v (T_1 - T_4) \quad (2.11)$$

$$S_1 - S_4 = C_v \ln(T_4/T_1) \quad (2.12)$$

ดังนั้นเมื่อเราทำการรวมทุกขั้นตอนของวัฏจักรเราจะได้

$$W_{net} = W_e + W_c \quad (2.13)$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_e} \quad (2.14)$$

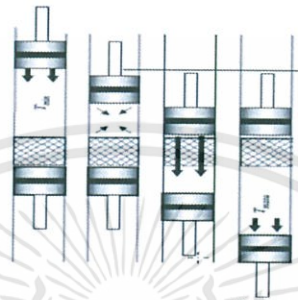
เมื่อ W_{net} คืองานสุทธิของวัฏจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

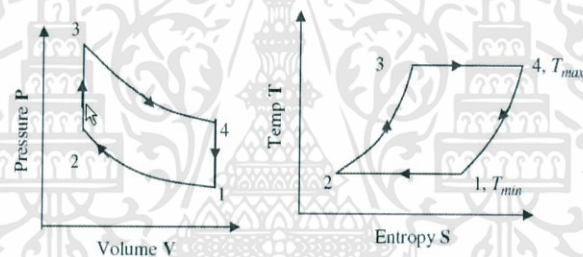
η_{th}

คือประสิทธิภาพทางความร้อน

ซึ่งเราสามารถแสดงลักษณะขั้นตอนของแต่ละกระบวนการได้ตามรูปที่ 2.2 และในรูปที่ 2.3 นั้นได้แสดงกราฟความดันและปริมาตร กับกราฟอุณหภูมิและเอนโทรปีซึ่งจะเห็นได้ว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับวัฏจักรคาร์โนต์มาก นี่แสดงให้เห็นว่าวัฏจักรสเตอร์ลิงมีประสิทธิภาพทางความร้อนตามทฤษฎีสูงเช่นกัน



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงลักษณะของลูกสูบในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรสเตอร์ลิง



รูปที่ 2.3 กราฟแผนภาพ P-v และ T-s ของวัฏจักรสเตอร์ลิง

2.3 รูปแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค่านั้นมีส่วนประกอบสำคัญโดยหลักคือจะมีการแบ่งเครื่องยนต์ออกเป็น ส่วนรับความร้อน(Hot zone) และส่วนระบายความร้อน(Cold zone) ซึ่งจะมีลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer piston) ที่อยู่ในด้านร้อนคอยทำหน้าที่ไล่สารทำงานภายในเครื่องยนต์ให้ไหลสลับจาก ด้านร้อนและเย็น และลูกสูบกำลัง(Power piston) ซึ่งเป็นลูกสูบที่ให้งานจากระบบ องค์ประกอบ โดยทั่วไปของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก็ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9

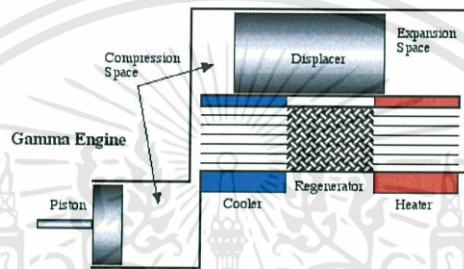
เนื่องจากเครื่องยนต์จะใช้การไหลเวียนของสารทำงานจึงต้องการอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างรวดเร็วเพื่อให้เครื่องยนต์สามารถทำงานให้เป็นไปตามวัฏจักรได้ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงคี่จึงมีการติดตั้งรีเจเนอเรเตอร์(Regenerator) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะพรุนทำหน้าที่ดึงความร้อนจากสารทำงานขณะเคลื่อนจากส่วนร้อนไปส่วนเย็นและเก็บไว้ และทำหน้าที่มอบความร้อนที่เก็บไว้คืนให้สารทำงานขณะเคลื่อนที่จากส่วนเย็นไปส่วนร้อนซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน

2.3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์แบบกลไกศาสตร์

2.3.1.1 เครื่องยนต์แบบส่งกำลัง 1 ทิศทาง

2.3.1.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแกรมม่า

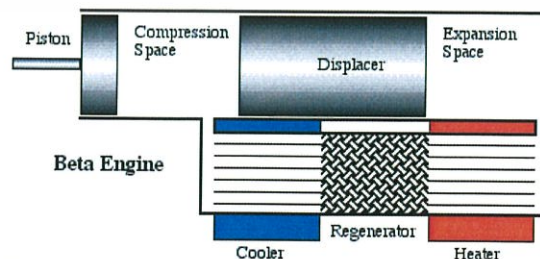
เครื่องยนต์ชนิดนี้จะทำงานโดยใช้ดีสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังที่ถูกติดตั้งแยกกันคนละกระบอกสูบแต่ส่งกำลังไปยังเพลอาซอเหวี่ยงเดียวกัน เนื่องจากลูกสูบทั้ง 2 ชนิดอยู่แยกกันและมีหน้าที่การทำงานแตกต่างกันอย่างชัดเจนทำให้กลไกชนิดแกรมม่าสามารถสร้างได้ง่ายและมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนด้วยเช่นกัน โดยความต่างเฟสที่เหมาะสมของกลไกชนิดนี้อยู่ที่ 100 องศา



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแกรมม่า

2.3.1.1.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดเบต้า

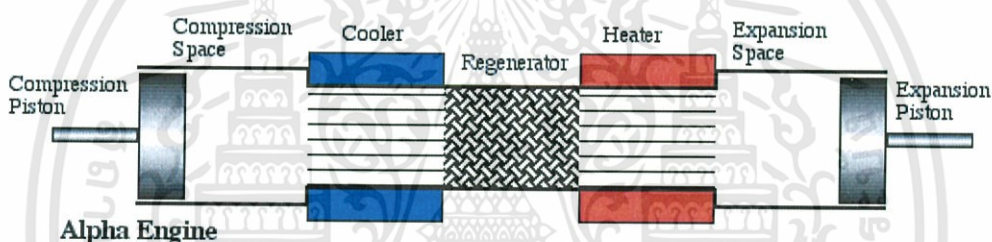
สำหรับกลไกเบตานั้นมีหลักการการทำงานคล้ายกับกลไกแกรมม่านั้นคือมีลูกสูบดีสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังทำงานแยกหน้าที่กันอย่างชัดเจน เพียงแต่ว่ากลไกชนิดเบตานั้นลูกสูบทั้ง 2 จะวางตัวอยู่ในกระบอกสูบเดียวกัน เครื่องยนต์จึงเป็นลักษณะ 1 กระบอกสูบโดยที่ดีสเพลสเซอร์จะวางตัวอยู่ในส่วนร้อนและลูกสูบกำลังจะวางตัวอยู่ในส่วนเย็น และจากการที่มีกระบอกสูบร่วมกันนี้ทำให้เครื่องยนต์มีอัตราการอัดตัวที่สูงมากอีกทั้งยังลดปริมาตรที่ไม่ถูกใช้งานได้ (Dead Volume) ทำให้เครื่องยนต์ชนิดเบต้าเป็นเครื่องยนต์ที่ทำกำลังได้สูงสุด โดยความต่างเฟสระหว่างลูกสูบทั้ง 2 จะให้กำลังสูงสุดอยู่ที่ 30 องศา แต่ทว่าเนื่องจากทั้งส่วนให้ความร้อนและส่วนระบายความร้อนอยู่ต่อกันทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนโดยไม่จำเป็นได้อีกทั้งหากอุณหภูมิส่วนเย็นเพิ่มขึ้นจากความร้อนที่ถูกส่งมาจากส่วนรับความร้อน จะทำให้งานที่ได้จากเครื่องยนต์ลดลงได้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดเบต้า

2.3.1.1.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

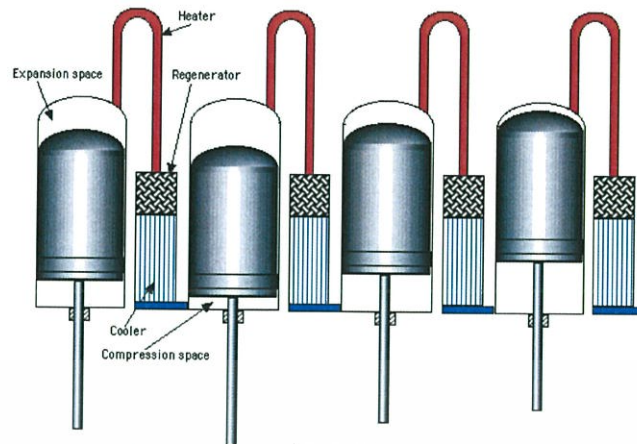
กลไกแอลฟาเป็นกลไกที่มีโครงสร้างของส่วนประกอบง่ายที่สุดโดยมีลูกสูบ 2 ลูกอยู่แยกกันคนละกระบอกสูบเช่นเดียวกับกลไกแกรมมา แต่ส่วนที่เป็นเอกลักษณ์ของกลไกชนิดนี้คือลูกสูบทั้ง 2 จะทำหน้าที่เป็นทั้งดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังทั้งคู่ โดยลูกสูบที่อยู่ในส่วนรับความร้อนจะเป็นลูกสูบขยายตัว โดยเมื่อสารทำงานเข้ามายังส่วนนี้จะรับความร้อนจากแหล่งและขยายตัวดันลูกสูบออกไป จากนั้นลูกสูบจะเคลื่อนที่กลับมาด้วยโมเมนต์ความเฉื่อยของเพลลาและทำหน้าที่ดิสเพลสเซอร์ไล่สารทำงานไปสู่ส่วนระบายความร้อน และเมื่อสารทำงานเข้ามาสู่ส่วนระบายความร้อนลูกสูบในส่วนนี้จะทำหน้าที่อัดสารทำงานให้มีความดันสูงสุดก่อนจะผลักสารทำงานนี้กลับไปรับความร้อนและขยายตัวต่อไปเกิดเป็นวัฏจักรของเครื่องยนต์ โดยงานที่ได้จากเครื่องยนต์แอลฟาจะเกิดขึ้น ณ จังหวะการขยายตัวที่ลูกสูบขยายตัวฝั่งรับความร้อน กลไกแอลฟานั้นสามารถสร้างอัตราการผลิตได้เทียบเท่ากับเครื่องยนต์เบต้าแต่กลไกมีขนาดเล็กและซับซ้อนน้อยกว่ามาก โดยความต่างเฟสที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ชนิดแอลฟาอยู่ที่ 80 องศา



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

2.3.1.2 เครื่องยนต์แบบส่งกำลัง 2 ทิศทาง

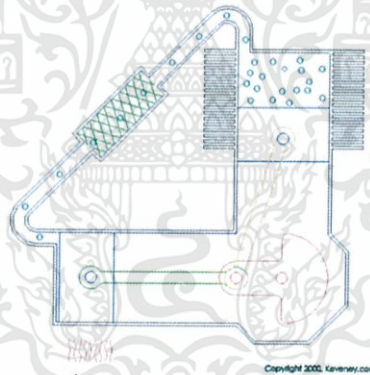
กลไกการส่งกำลังแบบ 2 ทิศทางนั้นเป็นการพัฒนามาจากกลไกชนิดแอลฟาซึ่งมีแนวคิดคือการเพิ่มจำนวนลูกสูบเพื่อเพิ่มกำลังที่จะได้ ลักษณะเด่นของกลไกชนิดนี้คือจะมีลูกสูบมากกว่า 2 ลูกสูบอยู่แยกกระบอกสูบกันโดยทั่วไปแล้วคือ 4 ลูกสูบ ซึ่งแต่ละลูกสูบนั้นจะทำหน้าที่เป็นทั้งลูกสูบกำลังและลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ในแต่ละกระบอกสูบนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนรับความร้อน, รีเจเนอเรเตอร์และส่วนระบายความร้อน การทำงานทำโดยสารทำงานจะรับความร้อนและขยายตัวดันลูกสูบจนเกิดงานหลังจากนั้นจะระบายความร้อนออก จากนั้นลูกสูบจะวิ่งกลับขึ้นมาด้วยแรงเฉื่อยเพื่อผลักสารทำงานไปยังกระบอกสูบถัดไป ในขณะที่สารทำงานถูกผลักไปนั้นก็จะถูกอัดตัวจากลูกสูบทั้ง 2 ลูกก่อนที่จะไปขยายตัวและสร้างงานในลูกสูบถัดไป ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดซ้ำไปเรื่อยๆในทุกๆ กระบอกสูบโดยที่แต่ละลูกสูบนั้นจะเคลื่อนที่ด้วยความต่างเฟสที่ 90 องศา



รูปที่ 2.7 ภาพแสดงลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดส่งกำลัง 2 ทิศทาง

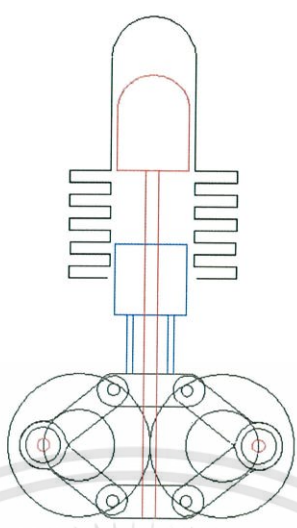
2.3.1.3 กลไกที่นิยมใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงประเภทต่างๆ ในปัจจุบัน

กลไกแบบตัววี (V-engine) เป็นกลไกที่นิยมใช้กับเครื่องยนต์ชนิดแอลฟา กระบอกสูบจะตั้งทำมุมกันเป็นรูปตัววีโดยการให้และระบายความร้อนออกจะเกิดขึ้นบริเวณท่อที่เชื่อมกันระหว่างส่วนร้อนและส่วนเย็น



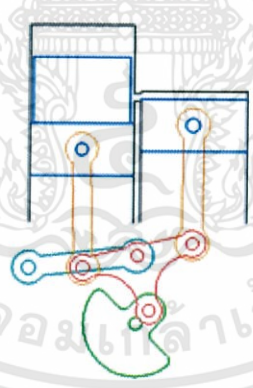
รูปที่ 2.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแอลฟาแบบตัววี

กลไกโรมบิก (Rhombic drive) เป็นกลไกที่ออกแบบมาสำหรับเครื่องยนต์ชนิดเบต้า ทำงานโดยการใช้เฟือง 2 ชุดคอยควบคุมการเคลื่อนที่ของก้านสูบที่อยู่ตรงกลางระหว่างเฟือง 2 ชุดนี้ กลไกนี้จะมีความสมดุลมากเนื่องจากแรงที่กระทำจากลูกสูบจะลงมาที่กึ่งกลางของเครื่องยนต์อีกทั้งยังสามารถลดแรงเสียดทานจากด้านข้างได้อีกเช่นกัน



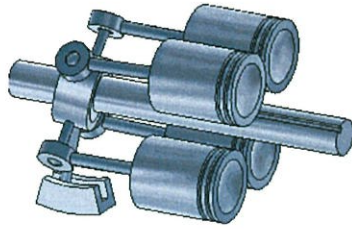
รูปที่ 2.9 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์เบต้ากลไกโรมบิก

กลไกโรสยอร์ก(Ross Yoke mechanism) เป็นกลไกที่ใช้กับเครื่องยนต์ที่มี 2 ลูกสูบโดยกลไกประกอบด้วยชิ้นส่วนยอร์ก(Yoke linkage) ซึ่งต่อกับก้านสูบทั้ง 2 และมีก้านร็อคเกอร์คอยระคองการเคลื่อนที่ของกลไก จุดเด่นของกลไกนี้คือสามารถออกแบบเครื่องยนต์ให้กระบอกสูบทั้ง 2 ตั้งขนานกันได้ซึ่งจะช่วยลดทั้งขนาดของเครื่องยนต์และแรงเสียดทานที่ลูกสูบ



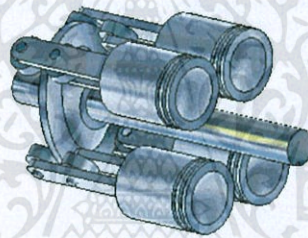
รูปที่ 2.10 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์กลไกโรสยอร์ก

กลไกวอเบิลเพลต(Wobble plate) เป็นกลไกที่ใช้กับเครื่องยนต์ประเภทส่งกำลัง 2 ทิศทาง ลูกสูบทั้ง 4 และเพลาส่งกำลังนั้นจะตั้งขนานกัน โดยการใช้ข้อต่อแบบลูกบอลเชื่อมต่อกับก้านสูบกับเพล่าทำให้มีความอิสระในการเคลื่อนที่มากขึ้นและมีข้อเหวี่ยงแบบตัว Z ระคองการเคลื่อนที่ของกลไกนี้



รูปที่ 2.11กลไกวอบบีลเพลต

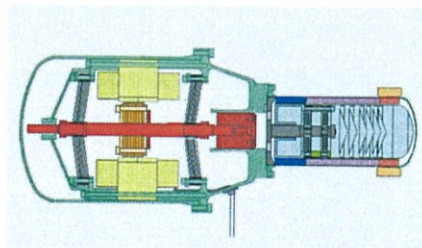
กลไกสวอชเพลต(Swash plate) ใช้กับเครื่องยนต์ประเภทส่งกำลัง 2 ทิศทาง เช่นกัน โดยกลไกทำงานในลักษณะเดียวกับวอบบีลเพลต แต่จะอาศัยจานหมุนตรงการคอยควบคุม เฟสการเคลื่อนที่และก้านสูบจะต่อกับงานนี้ด้วยแบริ่ง การใช้กลไกสวอชเพลตนี้เมื่อแรงกระทำที่ ลูกสูบส่งผ่านมายังเพลลา แบริ่งจะช่วยประคองการเคลื่อนที่และรับแรงเสียดทานด้านข้างจากลูกสูบไว้ ทำให้ลูกสูบสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่มีการแกว่งของก้านสูบ



รูปที่ 2.12กลไกสวอชเพลต

2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์แบบลูกสูบอิสระ

กลไกชนิดนี้จะไม่มีส่วนกลไกเชื่อมต่อกับดิสเพลสเซอร์หรือลูกสูบกำลัง การทำงานของ เครื่องยนต์จะอาศัยตัวสารทำงานในการส่งกำลังแทนชิ้นส่วนทางกล เคลื่อนที่ของลูกสูบจะเป็นการ เคลื่อนที่แบบสั่นโดยอาศัยสารทำงานซึ่งจะประพฤติตัวเหมือนสปริงคอยควบคุมการเคลื่อนที่และส่ง แรงให้กับเครื่องยนต์



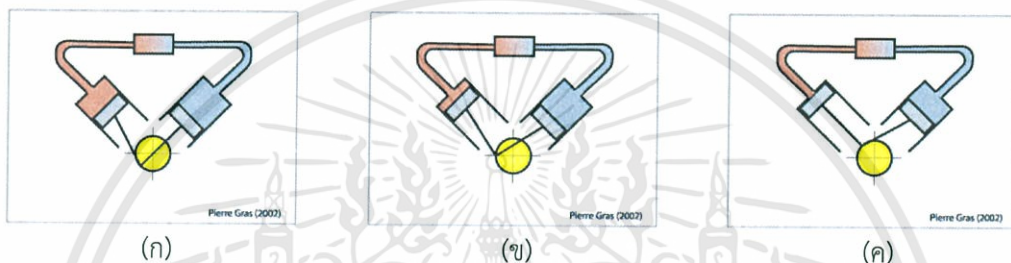
รูปที่ 2.13เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดลูกสูบอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟา

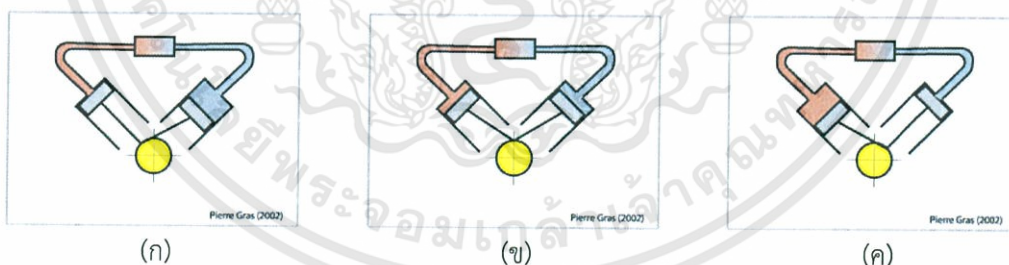
เครื่องยนต์แบบแอลฟานั้นจะมีลูกสูบ 2 ลูกสูบคือลูกสูบขยายตัว(Expansion piston) ซึ่งจะอยู่ในส่วนร้อนของเครื่องยนต์(Hot zone) และลูกสูบอัดตัว(Compression piston) ซึ่งอยู่ในส่วนเย็นของเครื่องยนต์(Cold zone) ซึ่งลูกสูบทั้ง 2 ต่างแยกกันอยู่คนละกระบอกสูบตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเราสามารถแสดงจังหวะการเคลื่อนที่ของลูกสูบในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1-2 กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิกงที่ ลูกสูบอัดตัวจะอยู่ในตำแหน่งศูนย์ตายล่าง และลูกสูบขยายตัวจะอยู่ ณ ตำแหน่งกลางกระบอกสูบที่สถานะที่ 1 ตามรูปที่ 2.12(ก) จากนั้นลูกสูบทั้งสองจะเคลื่อนที่ขึ้นตามรูปที่ 2.12(ข) และสารทำงานจะเข้าสู่สถานะที่ 2 ของวัฏจักร



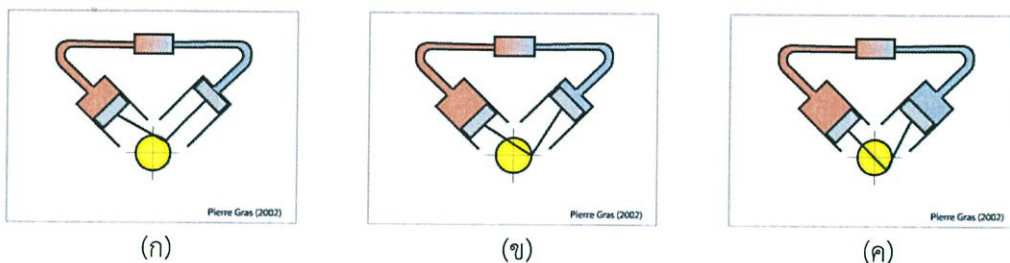
รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 1-2

ขั้นตอนที่ 2-3 กระบวนการรับความร้อนแบบปริมาตรคงที่ ลูกสูบอัดตัวจะเคลื่อนที่ขึ้นจากตำแหน่งที่ 2 โดยที่ลูกสูบขยายตัวจะเคลื่อนที่ลงเล็กน้อยโดยที่ยังไม่มีงานเกิดขึ้นมีเพียงแค่การรับความร้อนให้สารทำงานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่านั้นตามที่แสดงในรูปที่ 2.13(ก) ถึง (ค)



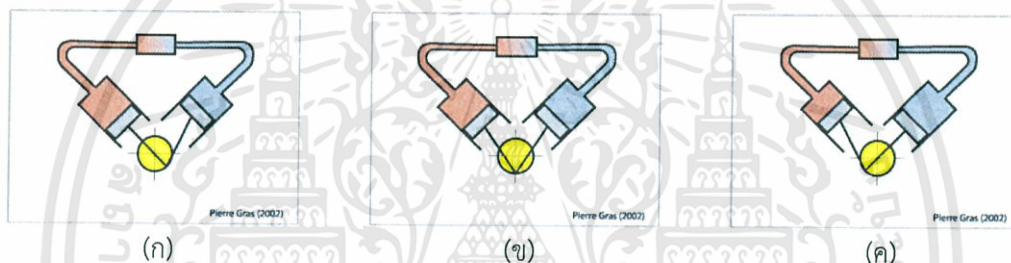
รูปที่ 2.15 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 2-3

ขั้นตอนที่ 3-4 กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิกงที่ ขั้นตอนนี้คือขั้นตอนที่มีงานเกิดขึ้นจากระบบโดยลูกสูบขยายตัวจะถูกสารทำงานที่มีพลังงานดันลงมาซึ่งในขณะเดียวกันก็จะดึงให้ลูกสูบอัดตัวเคลื่อนที่ลงมาเล็กน้อยด้วยเช่นกัน ซึ่งขั้นตอนนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 3-4

ขั้นตอนที่ 4-1 กระบวนการคายความร้อนแบบปริมาตรคงที่ ขั้นตอนนี้ลูกสูบขยายตัวจะเคลื่อนที่กลับขึ้นมาด้วยแรงเฉื่อยในเพลาค้อเหวี่ยงและผลึกสารทำงานจากจากกระบอกสูบขยายตัวไปยังอัดตัว โดยในขั้นตอนนี้เครื่องยนต์จะระบายความร้อนออกจากสารทำงานทำให้อุณหภูมิลดลงแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในปริมาตรซึ่งได้แสดงลักษณะลูกสูบของขั้นตอนนี้ไว้ตามรูปที่ 2.15(ก) ถึง (ค)



รูปที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 4-1

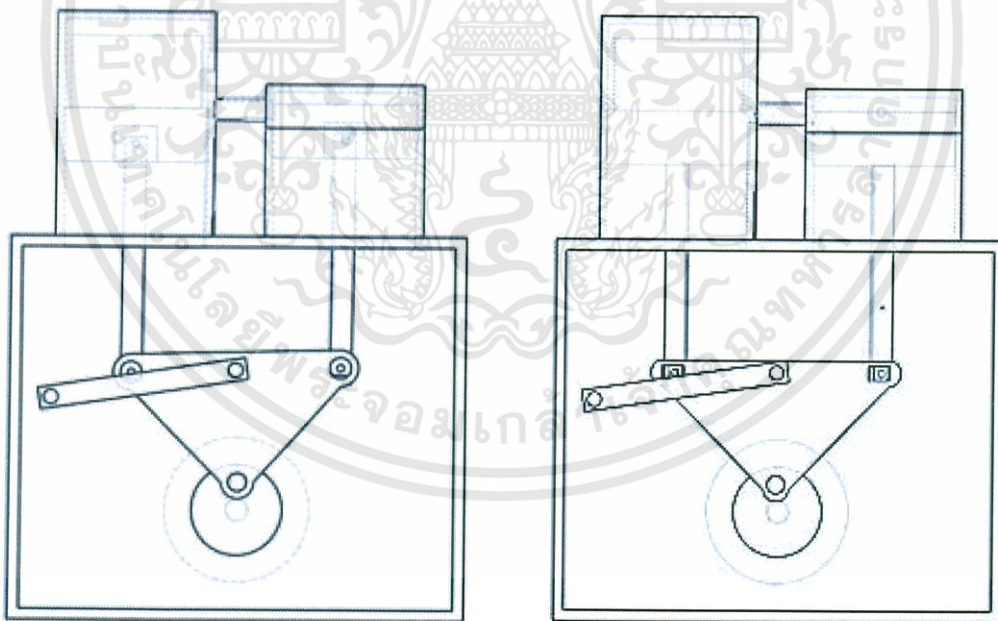
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

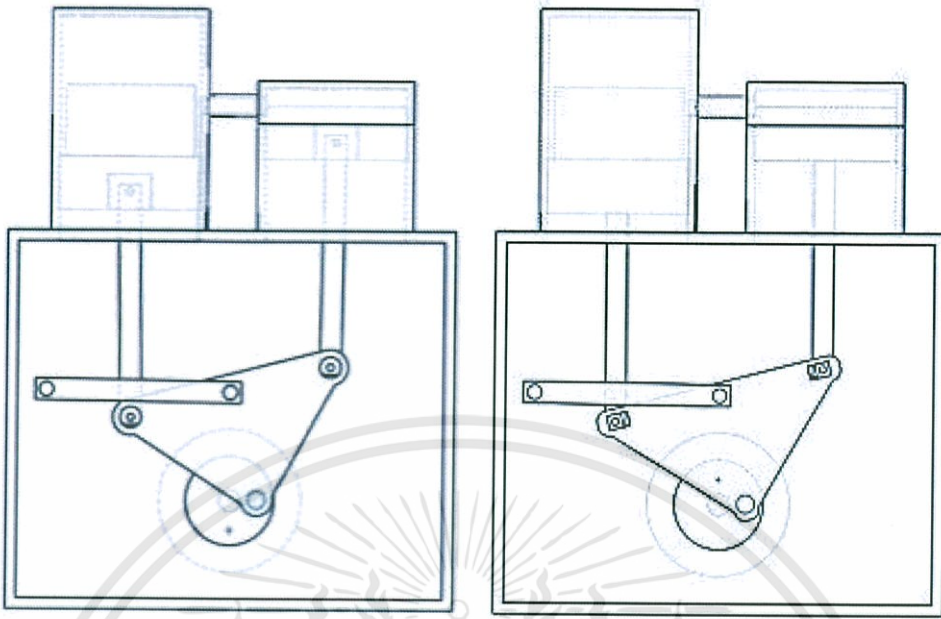
แนวคิดและการออกแบบการปรับปรุงกลไกโรตอร์ค

3.1 แนวคิดสำหรับการปรับปรุงกลไก

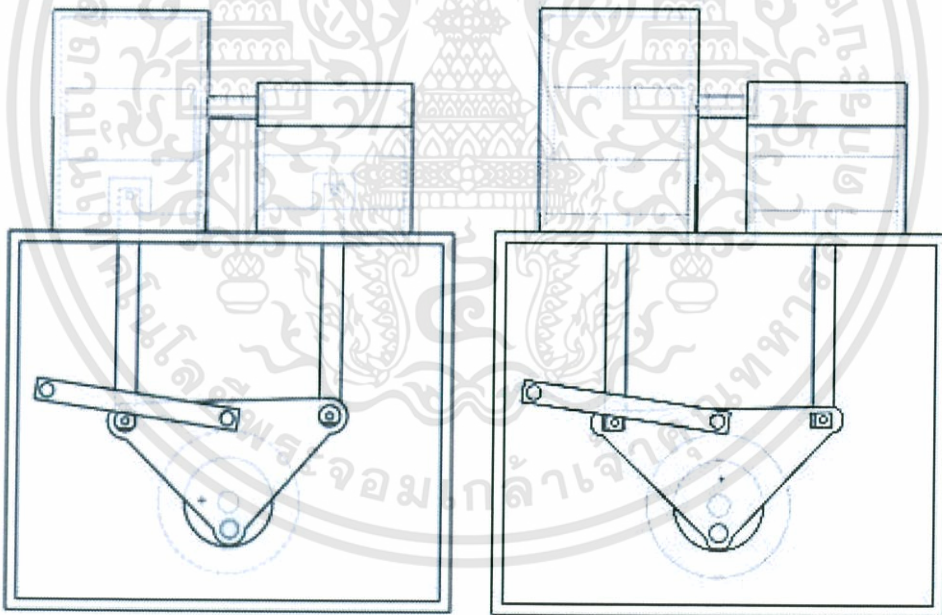
จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการจะปรับปรุงกลไกโรตอร์ค ให้สามารถส่งกำลังได้โดยที่ไม่มีการเสียตำแหน่งของก้านสูบนั้น จึงทำการศึกษาถึงรูปแบบกลไกที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ ซึ่งจากการศึกษาจึงได้แนวทางเพื่อที่จะพัฒนากลไก ให้สามารถที่จะคงตำแหน่งของก้านสูบให้เป็นเส้นตรงนั้น คือ การประยุกต์กลไกแบบสก็อตต์ยอร์ค[7] เข้ามาใช้โดยการเปลี่ยนข้อต่อระหว่างก้านสูบและชิ้นส่วนยอร์ค จากข้อต่อแบบยึดหมุดเป็นร่องรางเลื่อน ซึ่งจากรูปทรงทางเลขาคณิตแล้ว กลไกแบบเดิมจะดึงให้ก้านสูบเบี่ยงออกเล็กน้อยขณะที่โรตอร์คกำลังเอียงตัวขึ้น กลไกแบบปรับปรุงนั้นเนื่องจากข้อต่อระหว่างยอร์คกับก้านสูบนั้นไม่ได้ยึดติดกันตายตัว ข้อต่อจะไหลในรางในขณะที่ยอร์คยกตัวขึ้น ซึ่งประคองไม่ให้ก้านสูบเกิดการเบี่ยงศูนย์ โดยลักษณะการเคลื่อนไหวของกลไกนั้น ได้ทำการเปรียบเทียบกันตามรูปที่ 6.1 ถึง 6.4 โดยด้านซ้ายคือกลไกแบบเดิม ด้านขวาคือกลไกแบบปรับปรุง



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งของกลไกและลูกที่ตำแหน่งเพลลา 0 องศา

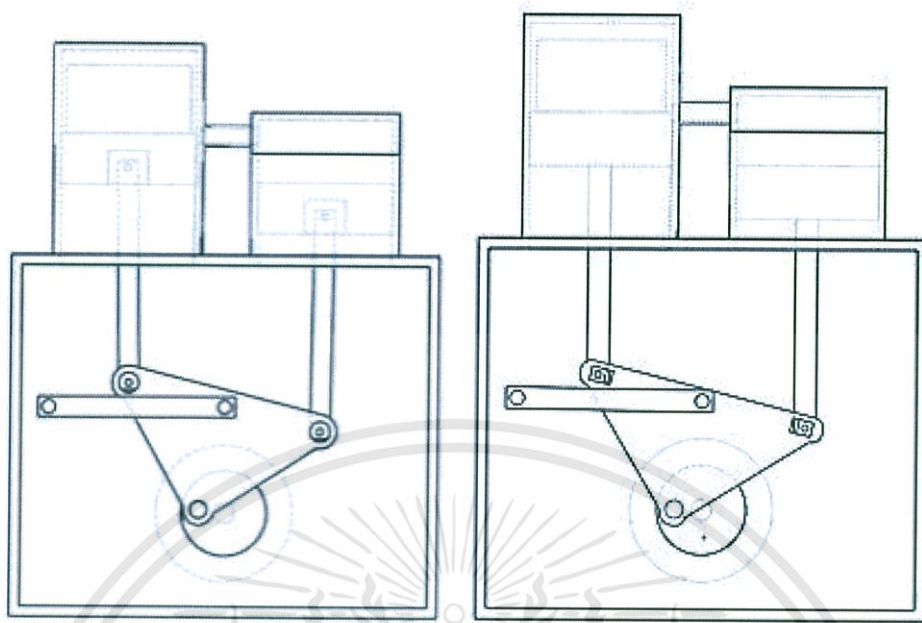


รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของกลไกและลูกที่ตำแหน่งเพลลา 90 องศา



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของกลไกและลูกที่ตำแหน่งเพลลา 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



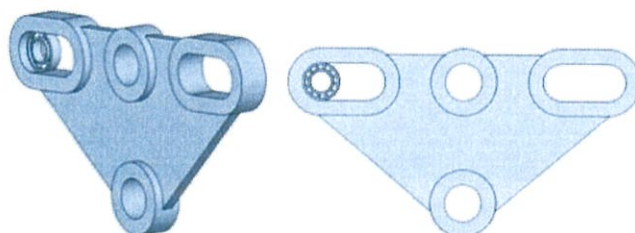
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของกลไกและลูกที่ตำแหน่งเพลลา 270 องศา

3.2 การออกแบบการปรับปรุงกลไก

สำหรับการออกแบบนั้นจะออกแบบโดยการใส่บอลเบริงมาประยุกต์เป็นข้อต่อของก้านสูบกับยอร์คซึ่งการออกแบบเป็นไปตามรูปที่ 6.5 ถึง 6.7

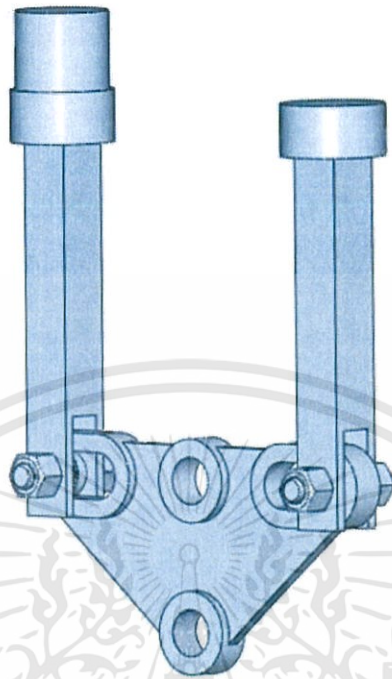


รูปที่ 3.5 ชิ้นส่วนรอสยอร์คแบบปรับปรุง



รูปที่ 3.6 ชิ้นส่วนรอสยอร์คแบบปรับปรุงเมื่อติดตั้งเบริงเป็นข้อต่อแบบเคลื่อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ชิ้นส่วนรอสยอร์คแบบปรับปรุงเมื่อติดตั้งแบร์ริงและก้านสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบ

4.1 สมมติฐานสำหรับการคำนวณในการออกแบบ

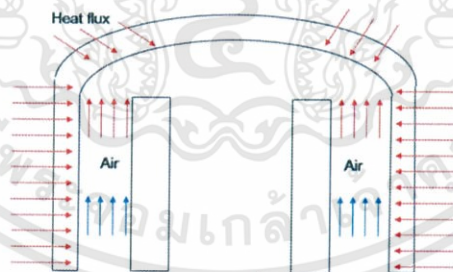
1. อากาศที่ใช้เป็นสารทำงานเป็นก๊าซอุดมคติ
2. ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว
3. การไหลของสารทำงานเป็นการไหลแบบคงตัว
4. ความดันมีค่าคงที่

การออกแบบจะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนสำหรับออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน[8] และทฤษฎี กู๊ดแมนแบบปรับปรุง[9] สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนทางกล ร่วมกับผลจำลองทางตัวเลขของ Iskander Tlili และ Sa'ed A. Musmar[10]

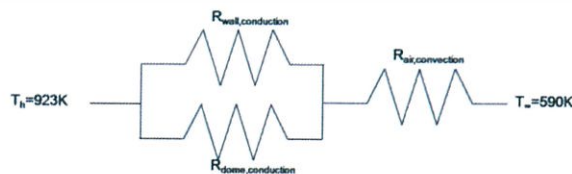
4.2 การออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน(Heat exchanger section)

4.2.1 โดมรับความร้อน(Heating Dome)

ความร้อนจะถูกส่งผ่านผนังของโดมมายังสารทำงานด้านในเครื่องยนต์โดยการเหนี่ยวนำ ความร้อน(heat conduction) และอากาศจะรับความร้อนจากผนังโดยการพาความร้อน(heat convection) ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนของชิ้นส่วนนี้และวงจรความร้อนได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนของโดมรับความร้อน



รูปที่ 4.2 วงจรความร้อนของโดมรับความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเราจะคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน(R) เพื่อให้ในการออกแบบขนาดของส่วนรับความร้อนนี้ โดยการใช้กฎการเหนี่ยวนำความร้อน(Law of heat conduction) และกฎการทำความเย็นของนิวตัน(Newton's law of cooling) จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

$$q = h(T - T_{\infty}) \quad (4.2)$$

ในการคำนวณเราจะเริ่มจากการพิจารณาขั้นตอนการเหนี่ยวนำความร้อนก่อน ซึ่งจากกฎการเหนี่ยวนำความร้อนเราจะได้สมการสำหรับค่าความต้านทานความร้อนสำหรับโดม โดยเราจะพิจารณาแบบโดมรับความร้อนนี้ออกเป็น 2 ส่วน นั่นคือส่วนผนังทรงกระบอกและส่วนยอดโดม ค่าความต้านทานความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$R_{dome} = \frac{x}{kA} \quad (4.3)$$

$$R_{wall} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi Lk} \quad (4.4)$$

เมื่อ	x	คือความหนาของผนังและโดม
	A	คือพื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน
	k	คือค่าความเหนี่ยวนำความร้อนของวัสดุ
	r_o, r_i	คือรัศมีภายนอกและภายในของผนังโดม
	L	คือความยาวของผนังทรงกระบอก

สำหรับการออกแบบเราได้ทำการกำหนดความหนาของผนังไว้เท่ากับ 1 มม. และรัศมีภายนอกและภายในของผนังเท่ากับ 23.3 และ 20.3 ตามลำดับ เราเลือกใช้ Stainless Steel 304 ซึ่งมีค่า k เท่ากับ $16.3 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้สามารถที่จะทนต่อการรับความร้อนและความดันภายในเครื่องยนต์ได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งเมื่อเราทำการแทนค่าลงในสมการที่ 4.3 และ 4.4 แล้วเราจะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.5 และ 4.6

$$R_{dome} = \frac{x}{kA} = \frac{1 \times 10^{-5}}{16.3 \times 1.430 \times 10^{-5}} = 0.0317 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \quad (4.5)$$

$$R_{wall} = \frac{\ln\left(\frac{20.3}{23.3}\right)}{2\pi L(16.3)} = \frac{10^4}{4.103L \times 10^{-3}} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเราสามารถรวมวงจรเฉพาะส่วนที่เป็นการนำความร้อนได้เป็นสมการที่ 4.7

$$R_{conduction} = \frac{1}{\frac{1}{R_{dome}} + \frac{1}{R_{wall}}} = \frac{1}{\frac{1}{0.0317} + \frac{4.103 \times 10^{-3}}{10^4}} \quad (4.7)$$

จากนั้นเราจะทำการพิจารณาการพาความร้อน โดยเริ่มจากการคำนวณความเร็วในการไหลของอากาศภายในเครื่องยนต์ จากการที่เราประเมินความเร็วรอบที่ตั้งเป้าไว้ที่ 4700 RPM และปริมาตรกระจัดเท่ากับ 25 cm^3 ตามเครื่องยนต์ของรถ ซึ่งเราสามารถหาความเร็วการไหลของอากาศได้จากสมการที่ 4.8

$$\dot{v}_{total} = 2V_{sw}N_s \quad (4.8)$$

เมื่อ \dot{v}_{total} คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)
 V_{sw} คือปริมาตรกระจัด (m^3)
 N_s คือความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rps)

ซึ่งเมื่อทำการแทนค่าลงในสมการที่ 4.8 เราจะได้อัตราการไหลของอากาศที่ไหลภายในเครื่องยนต์

$$\dot{v}_{total} = 2 \times 25 \times 10^{-6} \times \frac{4700}{60} = 3.916 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{sec}}$$

จากนั้นเราสามารถหาความเร็วของการไหลได้จากความสัมพันธ์

$$\bar{V}_{avg} = \frac{\dot{v}_{total}}{A} = \frac{3.916 \times 10^{-3}}{\pi \times (23.3^2 - 22.3^2) \times 10^{-6}} = 2.318 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

และเราจำเป็นที่จะต้องทราบคุณสมบัติของของไหลที่เราจะทำการพิจารณาก่อน ซึ่งเราจะทำการใช้คุณสมบัติที่อุณหภูมิ $T_{avg} = \frac{T_h + T_R}{2} = \frac{927 + 590}{2} = 758.5 \text{ K}$ ซึ่งอากาศจะมีคุณสมบัติดังนี้

ความหนาแน่น $\rho = 0.46689 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

ค่าความหนืด $\mu = 3.514 \times 10^{-5}$

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $k = 0.0548$

จากกฎการทำความเย็นของนิวตันเราจะสามารถหาค่าความต้านทานของการพาความร้อนได้จากสมการที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{1}{hA} \quad (4.9)$$

เมื่อ h คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m^2)
 A คือพื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน (m^2)

เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้จากความสัมพันธ์ของNu(Nusslte number) โดยที่ค่าNuของรูปทรงท่อกลวง(annular tube)สำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบฟลักซ์คงที่ จะเท่ากับ 5.354 เมื่ออัตราส่วนระหว่าง รัศมีภายในต่อรัศมีภายนอกเท่ากับ 0.954 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างNu กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป้ไปไปตามสมการที่ 4.10

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (4.10)$$

เมื่อทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4.10 นี้จะสามารถคำนวณหาค่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

$$h = \frac{Nu k}{D_h}$$

$$h = \frac{5.354 \times 0.0548}{2 \times 10^{-3}} = 146.69 \frac{W}{m^2}$$

ซึ่งเราจะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนได้เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4.9 เป็น

$$R = \frac{1}{hA} = \frac{1}{146.69 \times L \times [2\pi(23.3 \times 10^{-3}) + 1.78 \times 10^{-3}]} \quad (4.11)$$

และจากนั้นเมื่อเราทำการรวมวงจรทั้งหมดเราจะได้สมการสำหรับวงจรความร้อนของโดมรับความร้อนเป็นสมการที่ 4.12

$$\dot{Q}_{in} = \frac{T_h - T_\infty}{R_{conduction} + R_{convection}} \quad (4.12)$$

เมื่อทำการแทนสมการที่ 4.7 และ 4.11 ลงไปในสมการที่ 4.12 เราจะได้

$$\dot{Q}_{in} = \frac{T_h - T_\infty}{\frac{1}{0.0317} + \frac{4.103L \times 10^{-3}}{10^4} + \frac{1}{146.69 \times L \times [2\pi(23.3 \times 10^{-3}) + 1.78 \times 10^{-3}]}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่สิ่งที่เราต้องการคำนวณหา นั่นคือความยาวของผนังรับความร้อน L เมื่อเราทำการแทนค่าต่างๆ ลงไปจะได้ว่า

$$214.28 = \frac{927 - 590}{\frac{1}{\frac{1}{0.0317} + \frac{4.103L \times 10^{-3}}{10^4}} + \frac{1}{146.69 \times L \times [2\pi(23.3 \times 10^{-3}) + 1.78 \times 10^{-3}]}}$$

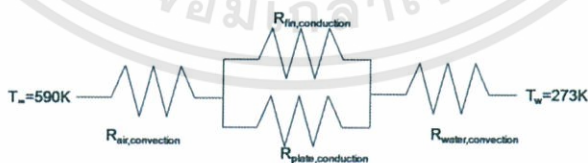
ทำการแก้สมการหาค่า L จะได้ค่าความยาวของผนังรับความร้อนเท่ากับ 18.4 มม. แต่เนื่องจากในการใช้งานจริงจะมีความร้อนที่สูญเสีย จากทั้งการการสูญเสียไปสู่ส่วนระบายความร้อน,การเสีสู่สิ่งแวดล้อม ,Shuttle effect หรือแรงเสียดทานในการไหล เราจึงจำเป็นต้องออกแบบเพื่อให้รับความร้อนได้มากขึ้นกว่าที่ตั้งไว้ จึงเลือกออกแบบให้ผนังมีความยาวเท่ากับ 30 มม.

4.2.2 ส่วนระบายความร้อน(Cooler)

เป็นชิ้นส่วนที่ทำการระบายความร้อนจากสารทำงานออกจากเครื่องยนต์ โดยชิ้นส่วนนี้จะประกอบด้วยครีบริบ ซึ่งมีการเรียงตัวในลักษณะช่องลม โดยอากาศจะไหลผ่านครีบริบเหล่านี้ และครีบริบจะรับความร้อนจากอากาศ โดยการพาความร้อน จากนั้นจะเหนี่ยวนำไปสู่อีกด้านของชิ้นส่วน และทำการปล่อยน้ำให้ไหลผ่าน เพื่อพาความร้อนนี้ออกนอกตัวเครื่อง โดยจะมีการเจาะสร้างรางน้ำไว้ซึ่งลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนและวงจรความร้อนของชิ้นส่วนระบายความร้อนนี้ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



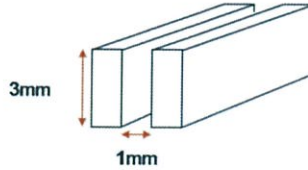
รูปที่ 4.3ภาพแสดงลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนของชิ้นส่วนระบายความร้อน



รูปที่ 4.4วงจรความร้อนของชิ้นส่วนระบายความร้อน

สำหรับชิ้นส่วนนี้เราจะทำการออกแบบโดยอ้างอิงขนาดเดิมของเครื่องยนต์ของรถ โดยสำหรับการระบายความร้อนออกนั้น เราจะใช้การไหลของน้ำในการควบคุมการระบายความร้อน ซึ่งจะทำให้การออกแบบนั้นง่ายขึ้น อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนได้สะดวก ซึ่งขนาดของส่วนต่างๆที่ได้อ้างอิงมาจากเครื่องยนต์ต้นแบบของรถสมิดังนี้

ขนาดของครีบ คือ กว้าง 1 มม. สูง 3 มม. ยาว 51.5 มม. จำนวน 15 ครีบ ซึ่งคิดเป็นท่อสี่เหลี่ยมทั้งหมด 16 ท่อปริมาตรรวมของส่วนระบายความร้อนคือ 2.745 ลบ.ซม.



รูปที่ 4.5 ภาพแสดงตัวอย่างของครีบรับความร้อน

จากนั้นเราจะใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบโดมรับความร้อน ในการคำนวณหาค่าความต้านทาน โดยเริ่มพิจารณาจากการพาความร้อนซึ่ง ณ จุดนี้เราจะทำการหาสถานะของอากาศที่อุณหภูมิ $T_{avg} = \frac{T_R + T_k}{2} = \frac{590 + 350}{2} = 470K$ ซึ่งอากาศจะมีคุณสมบัติดังนี้

$$\text{ความหนาแน่น } \rho = 0.7508 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{ค่าความหนืด } \mu = 2.566 \times 10^{-5}$$

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน } k = 0.03759$$

$$\text{Prandtl number, } Pr = 0.69767$$

โดยการคำนวณจะเริ่มจากการตรวจสอบลักษณะการไหลของสารทำงานว่าเป็นลักษณะ Laminar หรือ Turbulence ซึ่งจากอัตราการไหลซึ่งได้คำนวณไว้ก่อนหน้านี้เราได้ว่า $\dot{v}_{total} = 3.916 \times 10^{-3} \frac{m^3}{sec}$ เราเราจะคำนวณความเร็วการไหลของสารทำงานเมื่อกระจายแยกเข้าผ่านครีบรับความร้อนได้ตามสมการที่ (4.13)

$$V_{avg} = \frac{\dot{v}}{A} = \frac{0.244 \times 10^{-3}}{1 \times 3 \times 10^{-6}} = 81.33 \frac{m}{sec} \quad (4.13)$$

และจะสามารถคำนวณ Reynolds Number ได้ตามสมการที่ (4.14)

$$Re = \frac{\rho V_{avg} D_h}{\mu} = \frac{0.7508 \times 81.33 \times 1.5 \times 10^{-3}}{2.566 \times 10^{-5}} = 3569.5 \quad (4.14)$$

$$\text{เมื่อ } D_h = \frac{2 \times 1 \times 3}{1+3} = 1.5 \text{ mm}$$

ซึ่งจากค่า Reynolds Number ที่ได้นั้นเราสามารถระบุได้ว่าอากาศที่จะไหลผ่านครีบนั้นจะมีลักษณะแบบ Turbulence ซึ่งจะสามารถคำนวณ Nusslte Number ได้ตามสมการ (4.15)

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)} = \frac{\left(\frac{0.01915}{8}\right)(3569.5-1000)(0.69767)}{1+12.7\left(\frac{0.01915}{8}\right)^{0.5}\left(0.69767^{\frac{2}{3}}-1\right)} = 4.947 \quad (4.15)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt Number และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากสมการที่(4.9) ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 123.97C/W และสามารถคำนวณค่าความต้านทานความร้อนได้จากสมการที่ 4.10

$$R_{convect,air} = \frac{1}{hA} = \frac{1}{123.97 \times 5768 \times 10^{-6}} = 1.2236 \frac{^{\circ}C}{W}$$

ต่อไปเราจะพิจารณาขั้นตอนการนำความร้อน โดยการนำความร้อนจะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งครีบริบความร้อนและผนังของส่วนระบายความร้อนด้านใน ซึ่งเมื่อใช้กฎการนำความร้อนเราจะสามารถคำนวณค่าความต้านทานความร้อนในขั้นตอนการนำความร้อนในดังนี้

$$R_{fin} = \frac{X}{kA} = \frac{5 \times 10^{-3}}{231 \times 1 \times 51.5 \times 10^{-5}} = 0.4203 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_{plate} = \frac{X}{kA} = \frac{2 \times 10^{-3}}{231 \times 1 \times 51.5 \times 10^{-5}} = 0.163 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_{conduction} = \frac{1}{\frac{15}{R_{fin}} + \frac{16}{R_{widespace}}} = 0.00764 \frac{^{\circ}C}{W}$$

เมื่อใช้Aluminumเป็นวัสดุซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ $k=231 \frac{W}{m^{\circ}C}$

เนื่องจากการระบายความร้อนนั้นเราจะใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น เราจึงจะคำนวณหาค่าความต้านทานของน้ำที่ไหลเพื่อระบายความร้อน เราจึงจะทำการรวมวงจรความต้านทานทั้งหมดได้ตามสมการที่ (4.16)

$$Q_{out} = \frac{T_{air}-T_{water}}{R_{air}+R_{conduct}+R_{water}} \quad (4.16)$$

เมื่อทำการแทนค่าต่างๆเราจะได้สมการสำหรับคำนวณค่าความต้านทานของน้ำเป็นสมการที่ (4.17)

$$43.78 = \frac{390-298}{1.2236+0.00764+R_{water}} \quad (4.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเราจะได้อัตราความต้านทานของน้ำที่เราต้องการสำหรับการถ่ายเทความร้อนของระบบนี้เป็น 6.33C/W โดยเราจะใช้อัตราความต้านทานนี้ เพื่อคำนวณหาความเร็วของน้ำหล่อเย็นที่ต้องการได้ โดยการคำนวณจากสมการที่ (4.10), (4.11) และ (4.15)

$$R_{convect,water} = \frac{1}{hA} h = \frac{1}{R_{convect,water} \times A} = 113.245 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$$Nu = \frac{hD_h}{k} = \frac{113.245 \times 9 \times 10^{-3}}{0.644} = 1.5826$$

$$1.5826 = \frac{\left(\frac{L}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12.7\left(\frac{L}{8}\right)^{0.5}(Pr^{\frac{2}{3}}-1)} = \frac{\left(\frac{96}{8}\right)(Re-1000) \times 3.58}{1+12.7\left(\frac{96}{8}\right)^{0.5}(3.58^{\frac{2}{3}}-1)}$$

$$Re = 1002.208 = \frac{\rho V_{avg} D_h}{\mu} = \frac{988.1 \times V_{avg} \times 9 \times 10^{-3}}{0.0764 \times 10^{-3}}$$

ซึ่งเราจะได้อัตราความเร็วของน้ำที่ต้องการเท่ากับ $V_{avg} = 8.61 \times 10^{-3} \frac{m}{sec}$

4.2.3 กระจบอกสูบ

เราจำเป็นที่จะต้องออกแบบความหนาของกระจบอกสูบเพื่อให้สามารถรองรับความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นเครื่องยนต์ได้จากสมการที่(4.18)

$$\sigma_y = \frac{P_{max} d_i}{2t} \quad (4.18)$$

เมื่อ σ_y คือค่าYield Strength ของวัสดุ
 P_{max} คือความดันสูงสุดของเครื่องยนต์
 d_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของกระจบอกสูบ
 t คือความหนาของกระจบอกสูบ

ซึ่งเราสามารถคำนวณความหนาของกระจบอกสูบได้ดังนี้

$$t = \frac{P_{max} d_i}{2\sigma_y} = \frac{189.37 \times 10^3 \times 38.6 \times 10^{-3}}{2 \times 250 \times 10^6} = 1.46 \times 10^{-5} m = 0.0146 mm$$

โดยความหนาจะเลือกใช้ความหนาที่1mm เพื่อความสะดวกในการออกแบบและสร้างชิ้นงาน

4.3 การออกแบบชิ้นส่วนกลไก

ส่วนใหญ่ชิ้นส่วนรับโหลดจากลูกสูบซึ่งเป็นโหลดที่ไม่คงที่(Dynamics Load) ดังนั้นจึงต้องใช้ทฤษฎี Goodman แบบปรับปรุง(modified goodman)

$$\text{Safety factor} = N_s = \frac{S_e S_{ut}}{(\sigma'_a S_{ut} + \sigma'_m S_e)} \quad (4.19)$$

และจะใช้ *safety factor* เท่ากับ 10

- เมื่อ N_s คือ Safety Factor
 σ'_a คือ Alternating components of stress
 σ'_m คือ Mean components of stress
 S_{ut} คือ Ultimate Tensile stress
 S_e คือ Corrector endurance limit

และ ปรับค่าความแข็งแรงจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ขนาด รูปร่าง การสร้างชิ้นงาน และ สติติ โดย

$$S_e = C_{load} C_{size} C_{surf} C_{temp} C_{reliab} S'_e \quad (4.20)$$

- เมื่อ C_{load} คือ ผลจากแรงมีค่าเท่ากับ 0.7 ตามแนวแกน, 1 ตามแรงตัด
 C_{size} คือ ผลจากขนาดมีค่าเท่ากับ $1.189d^{-0.097}$
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นส่วนด้านที่รับแรง
 d_{eq} คือ $\sqrt{\frac{A_{95}}{0.765}}$: A = พื้นที่ของชิ้นส่วนด้านที่รับแรง
 C_{surf} คือ ผลจากการเก็บรายละเอียดของพื้นผิวเท่ากับ 0.866
 C_{temp} คือ ผลจากอุณหภูมิระหว่างใช้งาน เท่ากับ 1
 C_{reliab} คือ ผลทางสถิติของชิ้นวัสดุ เท่ากับ 0.897

โดยวัสดุที่ใช้คือ Stainless steel, Cast Iron

วิธีการที่ใช้คำนวณจะหา Endurance Limit และ แรงที่ได้รับ แล้ว นำไปใช้กับ ทฤษฎีกูดแมนฉบับปรับปรุง

ค่าต่างๆที่จำเป็นต้องใช้

$$P_{Max} = 1.8937 \times 10^5 Pa., P_{min} = 0.5692 \times 10^5 Pa.$$

$$F_{max} = P \times A = 1.8937 \times 10^5 \times \frac{\pi}{4} \times 38.6^2 \times 10^{-6} = 221.603 N.$$

$$F_{min} = P * A = 0.5692 \times 10^5 \times \frac{\pi}{4} \times 38.6^2 \times 10^{-6} = 66.608 N.$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ก้านสูบ

การออกแบบก้านสูบแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงก้าน และช่วงก้ามปูสำหรับสอดสตัด(Stud)

4.3.1.1 ก้านสูบส่วนบน



รูปที่ 4.6 ก้านสูบส่วนบน

นำสมการที่ 4.20 มาหาค่าความแข็งแรงที่แท้จริงของวัสดุ

$$S_e = 144.16 \times A^{-0.0485}$$

จากนั้นตั้งสมการที่ 4.19 เพื่อใช้คำนวณหาขนาดพื้นที่ที่รับแรง โดยนำค่าของตัวแปรต่างๆมาแก้

$$\text{Safety factor} = N_s = 10 = \frac{S_e S_{ut}}{(\sigma'_a S_{ut} + \sigma'_m S_e)}$$

รวมแรงทั้งหมดที่กระทำต่อชิ้นส่วน ด้วยทฤษฎี Von Mises

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{x_a}^2 + \sigma_{y_a}^2 - \sigma_{x_a} \sigma_{y_a} + 3\tau_{x_y_a}^2} = \sigma_{y_a}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{x_m}^2 + \sigma_{y_m}^2 - \sigma_{x_m} \sigma_{y_m} + 3\tau_{x_y_m}^2} = \sigma_{y_m}$$

โดย

$$\sigma_{y_a} = K_f \sigma_{anom} \quad \sigma_{y_m} = K_{fm} \sigma_{mnom}$$

เมื่อ K_f คือ Fatigue Stress Concentration factor

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) : K_t = 1 : \text{no stress concentration}$$

โดยให้ $K_f = K_{fm}$ by $\sigma_{max} < YS$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ K_t คือ Geometric Stress Concentration factor
 q คือ Neuber 's Constant

$$\sigma_{anom} = \frac{77.4975}{A} \quad \sigma_{mnom} = \frac{144.1055}{A}$$

เมื่อ σ_{anom} คือ Alternating Stress Nominal : $\sigma_{anom} = \frac{F_{max} - F_{min}}{2}$
 σ_{mnom} คือ Mean Stress Nominal : $\sigma_{mnom} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$

$$A = 8.8283 \text{ mm}^2$$

จาก C_{size} $8 \text{ mm} \leq d \leq 250 \text{ mm}$.

$$4.9024 \text{ mm}^2 \leq A \leq 4787.5 \text{ mm}^2.$$

$$8.8283 \text{ mm}^2 \leq A \leq 4787.5 \text{ mm}^2.$$

คำนวณแรงที่ทำให้เกิดการโก่ง

แรงที่ทำให้เกิดการโก่ง : $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2}$ สำหรับรูปแบบ fixed-pin $L_e = 0.8L$

$$P_{cr} = 566.732 \text{ N}.$$

4.3.1.2 ก้านสูบส่วนล่าง



รูปที่ 4.7 ก้านสูบส่วนล่าง

นำสมการที่ 4.20 มาหาค่าความแข็งแรงที่แท้จริงของวัสดุ

$$S_e = 144.16 \times A^{-0.0485}$$

จากนั้นตั้งสมการที่ 4.19 เพื่อใช้คำนวณหาขนาดพื้นที่ที่รับแรง โดยนำค่าของตัวแปรต่างๆมาแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Safety factor} = N_s = 10 = \frac{S_e S_{ut}}{(\sigma'_a S_{ut} + \sigma'_m S_e)}$$

รวมแรงทั้งหมดที่กระทำต่อชิ้นส่วน ด้วยทฤษฎี Von Mises

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{x_a}^2 + \sigma_{y_a}^2 - \sigma_{x_a} \sigma_{y_a} + 3\tau_{x_y_a}^2} = \sigma_{y_a}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{x_m}^2 + \sigma_{y_m}^2 - \sigma_{x_m} \sigma_{y_m} + 3\tau_{x_y_m}^2} = \sigma_{y_m}$$

โดย

$$\sigma_{y_a} = \frac{95.244}{A} \quad \sigma_{y_m} = \frac{177.1056}{A}$$

$$\sigma_{y_a} = K_f \sigma_{anom} \quad \sigma_{y_m} = K_{fm} \sigma_{mnom}$$

เมื่อ

K_f คือ Fatigue Stress Concentration factor

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) : q = \frac{1}{1 + \text{sqrt}(\frac{a}{r})} = \frac{1}{1 + \text{sqrt}(\frac{0.093}{0.25})} = 0.728$$

$$K_t = 1 + 2\left(\frac{a}{c}\right) = 3$$

$$K_f = 2.458$$

เมื่อ

K_t คือ Geometric Stress Concentration factor

q คือ Neuber 's Constant

$$\sigma_{anom} = \frac{38.74875}{A} \quad \sigma_{mnom} = \frac{72.05275}{A}$$

เมื่อ

σ_{anom} คือ Alternating Stress Nominal : $\sigma_{anom} = \frac{F_{max} - F_{min}}{2}$

σ_{mnom} คือ Mean Stress Nominal : $\sigma_{mnom} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$

$$A = 10.9263 \text{ mm}^2.$$

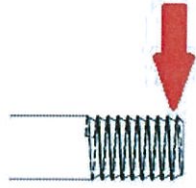
จาก $C_{size} \ 8 \text{ mm.} \leq d \leq 250 \text{ mm.}$

$$4.9024 \text{ mm}^2. \leq A \leq 4787.5 \text{ mm}^2$$

$$10.9263 \text{ mm}^2. \leq A \leq 4787.5 \text{ mm}^2$$

4.3.2 สตั๊ด(Stud)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 สตัด

นำสมการที่ 4.20 มาหาค่าความแข็งแรงที่แท้จริงของวัสดุ

$$S_e = 196.1425 \text{ MPa.}$$

คำนวณหาแรงที่กระทำ

$$\frac{F_{max}}{2} = 110.8015 \text{ N. } \frac{F_{min}}{2} = 33.304 \text{ N.}$$

$$F_m = 72.05275 \text{ N } F_a = 38.74875 \text{ N}$$

$$M_a = F_a x = 38.74875 x \text{ N.m } M_m = F_m x = 72.05275 x \text{ N.m}$$

$$I = \frac{\pi}{4} \times r^4 = 3.06 \times 10^{-10} \text{ m}^4.$$

$$\sigma_{anom} = \frac{Mc}{I} = 316.574 x \text{ MPa}$$

$$\sigma_{mnom} = \frac{Mc}{I} = 588.666 x \text{ MPa}$$

คำนวณค่า Stress Concentration Factor

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) : K_t = 1 : \text{no stress concentration}$$

- เมื่อ K_f คือ Fatigue Stress Concentration factor
 K_t คือ Geometric Stress Concentration factor
 q คือ Neuber 's Constant

$$\text{ให้ } K_f = K_{fm} \text{ by } \sigma_{max} < YS$$

$$\sigma_{ya} = K_f \sigma_{anom} \quad \sigma_{ym} = K_{fm} \sigma_{mnom}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + \sigma_{ya}^2 - \sigma_{xa} \sigma_{ya} + 3\tau_{xya}^2} = \sigma_{ya}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

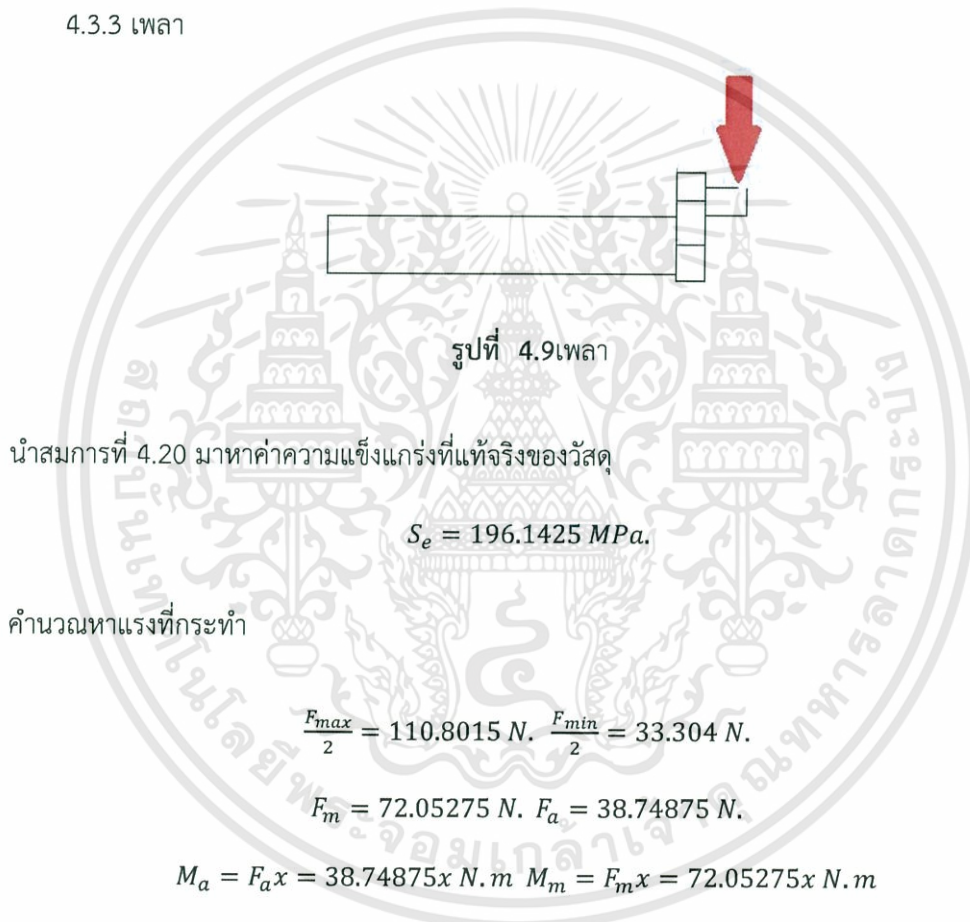
$$\sigma'_m = \text{Sqrt}(\sigma_{x_m}^2 + \sigma_{y_m}^2 - \sigma_{x_m} \sigma_{y_m} + 3\tau_{xy_m}^2) = \sigma_{y_m}$$

นำตัวแปรทั้งหมดไปใส่ในสมการ 4.20

$$\text{Safety factor} = N_s = 10 = \frac{S_e S_{ut}}{(\sigma'_a S_{ut} + \sigma'_m S_e)}$$

$$X \leq 0.0359754 \text{ m.}$$

4.3.3 เพลลา



นำสมการที่ 4.20 มาหาค่าความแข็งแรงที่แท้จริงของวัสดุ

$$S_e = 196.1425 \text{ MPa.}$$

คำนวณหาแรงที่กระทำ

$$\frac{F_{max}}{2} = 110.8015 \text{ N. } \frac{F_{min}}{2} = 33.304 \text{ N.}$$

$$F_m = 72.05275 \text{ N. } F_a = 38.74875 \text{ N.}$$

$$M_a = F_a x = 38.74875x \text{ N.m } M_m = F_m x = 72.05275x \text{ N.m}$$

$$I = \frac{\pi}{4} \times r^4 = 4.908 \times 10^{-10} \text{ m}^4.$$

$$\sigma_{anom} = \frac{Mc}{I} = 197.37x \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{mnom} = \frac{Mc}{I} = 367.016x \text{ Mpa}$$

$$\tau_{xy_a} = F_a \times r \times A = 38.74875 \text{ N.} \times 7.5 \times 10^{-3} \times \pi \times 5^2 \times 10^{-6} = 2.282 \times 10^{-5} \text{ N-m}$$

$$\tau_{xy_m} = F_m \times r \times A = 72.05275 \times 7.5 \times 10^{-3} \times 5^2 \times 10^{-6} = 4.244 \times 10^{-5} \text{ N-m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ใช่ τ_{xya}, τ_{xym}

คำนวณค่า Stress Concentration Factor

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) : K_t = 1 : \text{no stress concentration}$$

โดยให้ $K_f = K_{fm}$ by $\sigma_{max} < YS$

- เมื่อ K_f คือ Fatigue Stress Concentration factor
 K_t คือ Geometric Stress Concentration factor
 q คือ Neuber 's Constant

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{x_a}^2 + \sigma_{y_a}^2 - \sigma_{x_a}\sigma_{y_a} + 3\tau_{x_y_a}^2} = \sigma_{ya}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{x_m}^2 + \sigma_{y_m}^2 - \sigma_{x_m}\sigma_{y_m} + 3\tau_{x_y_m}^2} = \sigma_{ym}$$

นำตัวแปรทั้งหมดไปใส่ในสมการ 4.20

$$\text{Safety factor} = N_s = 10 = \frac{S_e S_{ut}}{(\sigma'_a S_{ut} + \sigma'_m S_e)}$$

$$X \leq 0.0577027 m.$$

4.3.4 รอสยอร์ด(Ross Yoke)



รูปที่ 4.10 รอสยอร์ด

นำสมการที่ 4.20 มาหาค่าความแข็งแรงที่แท้จริงของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_e = 137.3 \text{ MPa.}$$

จากนั้นตั้งสมการที่ 4.19 เพื่อใช้คำนวณหาขนาดพื้นที่ที่รับแรง โดยนำค่าของตัวแปรต่างๆมาแก้

$$\text{Safety factor} = N_s = \frac{S_e S_{ut}}{(\sigma'_a S_{ut} + \sigma'_m S_e)}$$

รวมแรงทั้งหมดที่กระทำต่อชิ้นส่วน ด้วยทฤษฎี Von Mises

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{x_a}^2 + \sigma_{y_a}^2 - \sigma_{x_a} \sigma_{y_a} + 3\tau_{x_y_a}^2} = \sigma_{y_a}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{x_m}^2 + \sigma_{y_m}^2 - \sigma_{x_m} \sigma_{y_m} + 3\tau_{x_y_m}^2} = \sigma_{y_m}$$

หาค่า Stress concentration factor

$$\sigma_{y_a} = K_f \sigma_{anom} \quad \sigma_{y_m} = K_{fm} \sigma_{mnom}$$

เมื่อ K_f คือ Fatigue Stress Concentration factor

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad K_t = 1 : \text{no stress concentration}$$

$$\text{ให้ } K_f = K_{fm} \text{ by } \sigma_{max} < YS$$

เมื่อ K_t คือ Geometric Stress Concentration factor

q คือ Neuber 's Constant

$$\sigma_{anom} = 15.5 \text{ MPa.} \quad \sigma_{mnom} = 28.82 \text{ MPa.}$$

เมื่อ σ_{anom} คือ Alternating Stress Nominal : $\sigma_{anom} = \frac{F_{max} - F_{min}}{2}$

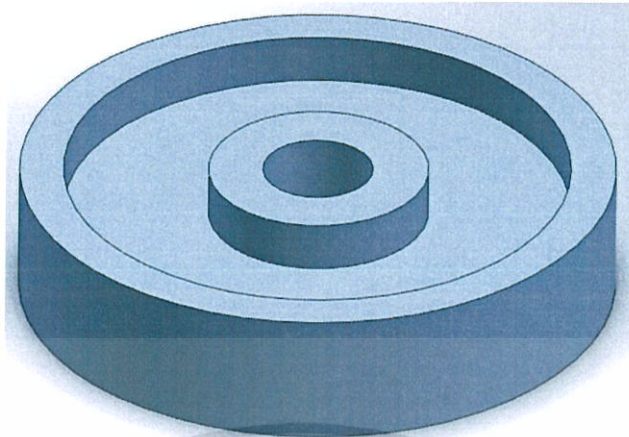
σ_{mnom} คือ Mean Stress Nominal : $\sigma_{mnom} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$

นำ σ_{anom} , σ_{mnom} ไปใช้ในสมการ safety factor

ได้ safety factor = 5.88

4.3.5 ล้อช่วยแรง(Flywheel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ล้อช่วยแรง

การคำนวณขนาดของล้อช่วยแรงจะทำ โดยการหาขนาดของโมเมนต์ความเฉื่อยที่สามารถเก็บสะสมพลังงานไว้ระหว่างการหมุนได้ โดยพลังงานที่ล้อช่วยแรงต้องสะสมในหนึ่งรอบปฏิภาณนั้น มีดังนี้

W_c คือ พลังงานที่ต้องใช้สำหรับจังหวะการอัดตัวของเครื่องยนต์

E_k คือ พลังงานจลน์สำหรับการขับเคลื่อนกลไก

E_f คือ พลังงานที่ต้องเอาชนะแรงเสียดทาน

ซึ่งพลังงานทั้ง3ส่วนนั้นสามารถคำนวณมีค่าดังนี้

$$W_c = 0.8352 \text{ J (ซึ่งสำหรับการคำนวณจะกล่าวถึงในบทที่5)}$$

$$E_k = \frac{1}{2} mV^2 \quad (4.20)$$

เมื่อ m คือ น้ำหนักรวมของกลไก, kg

V คือ ความเร็วของกลไก (ในที่นี้พิจารณาจากความเร็วของลูกสูบ), m/s

โดยน้ำหนักรวมของกลไกนั้นเป็นน้ำหนักรวมของลูกสูบทั้ง 2 ชุดและชิ้นส่วนรอสยอร์คซึ่งจากการประเมินจากขนาดและวัสดุจะมีขนาด 0.5 kg และความเร็วของกลไกนั้นใช้การอ้างอิงจากต้นแบบของรอส[4] ซึ่งมีความเร็ว 3.352 m/s ซึ่งเราจะได้พลังงานในส่วนนี้เท่ากับ

$$E_k = \frac{1}{2} \times 0.5 \times 3.352^2 = 2.808$$

และ E_f คำนวณจากการประเมินถึงพลังงานที่สูญเสียจากแรงเสียดทานซึ่งได้ประเมินไว้เท่ากับ 70% ของพลังงานรวมระหว่าง W_c และ E_k ซึ่งจะได้เท่ากับ 5.19 J และเราจะหาโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับ ล้อช่วยแรงได้จาก

$$I = \frac{2(W_c + E_k + E_f)}{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2} \quad (4.21)$$

เมื่อ ω_{max} คือ ความเร็วเชิงมุมสูงสุด, 492.1 rad/s
 ω_{min} คือ ความเร็วเชิงมุมต่ำสุด, 287.97 rad/s

ซึ่งความเร็วเชิงมุมทั้ง 2 ค่าได้อ้างอิงมาจากเครื่องยนต์ดั้งเดิมของรถสามล้อในการออกแบบ โดยเราจะ ได้ขนาดโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงนี้เท่ากับ $1.11 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$ ซึ่งในทางปฏิบัติเราจะนำค่าที่ ได้จากการออกแบบนี้ไปใช้จริง และทำการทดสอบการใช้งาน และทำการปรับเปลี่ยนขนาดจนกระทั่ง ได้ขนาดที่เหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิเคราะห์วัฏจักรของเครื่องยนต์

5.1 สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์

- 1 เป็นกระบวนการ Regenerative อย่างสมบูรณ์แบบ
- 2 ความดันภายในเครื่องยนต์ ณ ขณะใด ๆ มีค่าเท่ากันในทุกส่วน
- 3 สารทำงานประพฤติตัวตามสมการแก๊สอุดมคติ
- 4 มวลของสารทำงานคงที่ ไม่มีการรั่วไหล
- 5 ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นไซน์
- 6 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชุดแลกเปลี่ยนความร้อน
- 7 อุณหภูมิของกระบอกสูบ, ลูกสูบ และในแต่ละส่วนของเครื่องยนต์มีค่าคงที่
- 8 สารทำงานอยู่ในสภาวะคงตัว
- 9 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่
- 10 ไม่มีการสูญเสียความดันเนื่องจากแรงเสียดทานในเครื่องยนต์

5.2 รายละเอียดของเครื่องยนต์ต้นแบบ

จากการออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบในบทที่ 4 เราจะได้รายละเอียดของเครื่องยนต์ในแต่ละส่วนโดยรายละเอียดทั้งหมดถูกระบุไว้ตามตารางที่ 5.1 ซึ่งค่าต่างๆในตารางนี้จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์วัฏจักรต่อไป

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของเครื่องยนต์

ชิ้นส่วน/ตัวแปร	ค่า/ชนิด
ชนิดเครื่องยนต์	แอลฟา
สารทำงาน	อากาศ
รัศมีข้อเหวี่ยง, r	0.7cm
ขนาดYoke, d_2	2.9cm
ระยะลูกสูบ, z	2.9cm
พื้นที่หน้าตัดลูกสูบขยายตัว, A_e	1170mm ²
พื้นที่หน้าตัดลูกสูบอัดตัว, A_c	1170mm ²
ความดันเฉลี่ยเครื่องยนต์, P_{mean}	101.3kPa

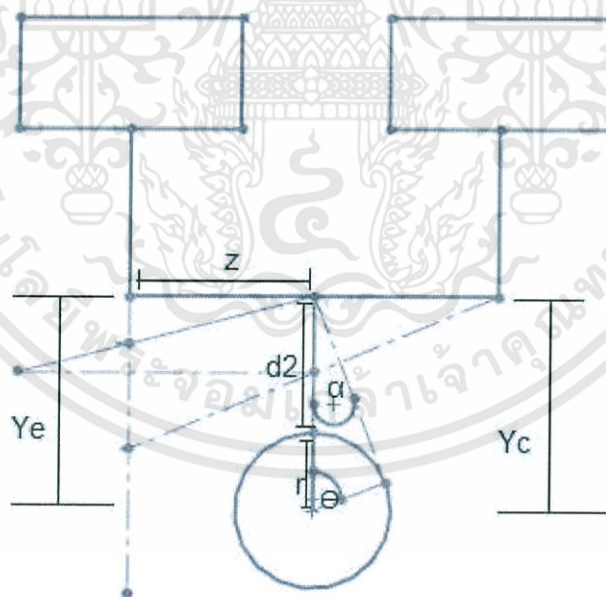
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของเครื่องยนต์(ต่อ)

อุณหภูมิส่วนร้อน, T_h	923K
อุณหภูมิส่วนเย็น, T_k	350K
อุณหภูมิRegenerator, T_R	590K
ปริมาตรรับส่วนความร้อน, V_h	5.86cm^3
ปริมาตรส่วนระบายความร้อน, V_k	2.475cm^3
ปริมาตรRegenerator, V_R	6cm^3
ปริมาตรกระจัด (Swept Volume), V_{se} , V_{sc}	25cm^3

5.3 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลไก

เราสามารถหาสมการการเคลื่อนที่ของลูกสูบบนกลไกโรสยอร์ด เพื่อที่นำไปวิเคราะห์วัฏจักรต่อไป โดยเราสามารถหาสมการการเคลื่อนที่ได้จากแผนภาพแสดงกลไกตามรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภาพแสดงกลไกโรสยอร์ด

และจากแผนภาพในรูปที่ 5.1 เราจะได้สมการระบุตำแหน่งของลูกสูบขยายตัว Y_e และลูกสูบอัดตัว Y_c ได้ตามสมการที่ 5.1 และ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_e = r \left[\cos \theta - \frac{z}{d_2} \sin \theta \right] + \sqrt{d_2^2 - (r \sin \theta)^2} \quad (5.1)$$

$$Y_c = r \left[\cos \theta + \frac{z}{d} \sin \theta \right] + \sqrt{d_2^2 - (r \sin \theta)^2} \quad (5.2)$$

และจากสมการข้างต้นเราจะได้สมการการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกระบอกสูบขยายตัว V_e และอัดตัว V_c ได้ตามสมการที่ (5.3) และ (5.4)

$$V_e = V_{de} + A_e(Y_{e,max} - Y_e) \quad (5.3)$$

$$V_c = V_{dc} + A_c(Y_{c,max} - Y_c) \quad (5.4)$$

เมื่อ A_e คือพื้นที่หน้าตัดกระบอกสูบขยายตัว (m^2)
 A_c คือพื้นที่หน้าตัดกระบอกสูบอัดตัว (m^2)
 $Y_{e,max}$ คือตำแหน่งสูงสุดของลูกสูบขยายตัว (m)
 $Y_{c,max}$ คือตำแหน่งสูงสุดของลูกสูบขยายตัว (m)

5.4 การวิเคราะห์แบบอุณหภูมิกคงที่ (Isothermal Analysis)

จากสมมติฐานที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อที่ 5.1 โดยการวิเคราะห์จะเริ่มจากการตั้งสมมติฐานว่ามวลในเครื่องยนต์นั้นคงที่ตลอดกระบวนการจามสมการที่ (5.5)

$$M = M_e + M_h + M_R + M_k + M_c \quad (5.5)$$

และจากสมการแก๊สอุดมคติเราสามารถเปลี่ยนรูปสมการที่ 5.5 ได้เป็นสมการที่ 5.6

$$M = \frac{PV_e}{RT_h} + \frac{PV_h}{RT_h} + \frac{PV_R}{RT_R} + \frac{PV_k}{RT_k} + \frac{PV_c}{RT_k} \quad (5.6)$$

เมื่อความดัน ณ แต่ละจุดมีค่าเท่ากันเราจะได้สมการระบุความดันตามสมการที่ 5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = MR / \left[\frac{V_e}{T_h} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_k}{T_h} + \frac{V_c}{T_k} \right] \quad (5.7)$$

โดยการแทนสมการที่ 5.3 และ 5.4 ลงในสมการที่ 5.7 เราจะสามารถระบุความดันของเครื่องยนต์ ณ ตำแหน่งของลูกสูบต่างๆได้ และเราสามารถหาพลังงานสุทธิจากวัฏจักรได้จากสมการที่ 5.8 ถึง 5.10

$$W_e = \int P dV_e \quad (5.8)$$

$$W_c = \int P dV_c \quad (5.9)$$

$$W_{net} = W_e + W_c \quad (5.10)$$

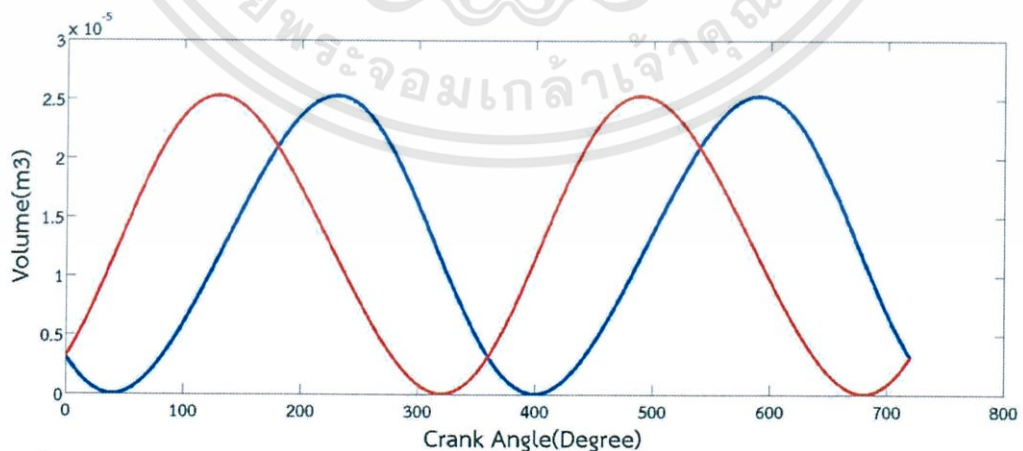
ต่อมาเราจะทำการแทนค่าต่างๆที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5.1 ลงในสมการที่ 5.1 ถึง 5.10 และเนื่องจากสมการที่ใช้นั้นมีความซับซ้อนเราจึงจะใช้โปรแกรมMATLABในการคำนวณ เพื่อทำการวิเคราะห์วัฏจักรของเครื่องยนต์ โดยโค้ดของโปรแกรมนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 โดยผลจากการวิเคราะห์นั้น เราจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 2 ลูกกับตำแหน่ง ขององศาของเพลาคือข้อเหวี่ยง และกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันตามตำแหน่งของเพลารวมถึงแผนภาพความดันกับปริมาตรตามรูปที่ 5.3 ถึง 5.5 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อเราได้ผลจากการวิเคราะห์ทั้งหมดแล้วเราจึงทำการสรุปค่าต่างๆที่ได้ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2

```

r = 0.0076; %Crank radius
b1 = 0.029; %Yoke length
b2 = 0.029; %Piston length
Vk = 2.475e-6; %Cooler volume
Vr = 6e-6; %Regenerator volume
Vh = 5.8e-6; %Heater volume
Vde = 0; %Expansion dead volume
Vdc = 0; %Compression Dead volume
m = 2.183e-5; %Mass of air
R = 287; %Air constant
cv = 718; %Air constant volume heating capacity
Th = 923; %Hot Temperature (K)
Tk = 350; %Cold Temperature (K)
Tr = 590; %Regenerator Temperature (K)
Ae = 1170e-6; %Hot Piston bore area
Ac = 1170e-6; %Cold Piston bore area
x = [0:720]; %Crank angle
Yc = r*(cosd(x)+(b2/b1)*sind(x))+sqrt(b1.^2-(r*sind(x)).^2); %Cold piston displacement
Ye = r*(cosd(x)-(b2/b1)*sind(x))+sqrt(b1.^2-(r*sind(x)).^2); %Hot piston displacement
Ve = Vde+Ae*(max(Ye)-Ye);
Vc = Vdc+Ac*(max(Yc)-Yc);
Vtotal = Ve+Vc+Vh+Vk+Vr;
n = (Ve/Th+Vh/Th+Vr/Tr+Vk/Tk+Vc/Tk).^-1;
p = m*R*n; %Pressure variation
pmean=mean(p); %Mean pressure
figure %%Piston-crank diagram
plot(x,Vc,'blue',x,Ve,'red');
xlabel('Crank Angle(Degree)');
ylabel('Volume(m3)');
figure %Pressure-crank diagram
plot(x,p);
xlabel('Crank Angle(Degree)');
ylabel('Engine Pressure(Pa)');
figure %P-v diagram
plot(Vtotal,p);
xlabel('Engine Volume(m3)');
ylabel('Engine Pressure(Pa)');
W = trapz(Vtotal,p) %Net work
We = trapz(Ve,p) %Work in
Wc = trapz(Vc,p) %Work out
eff = W*100/We %Thermal efficiency

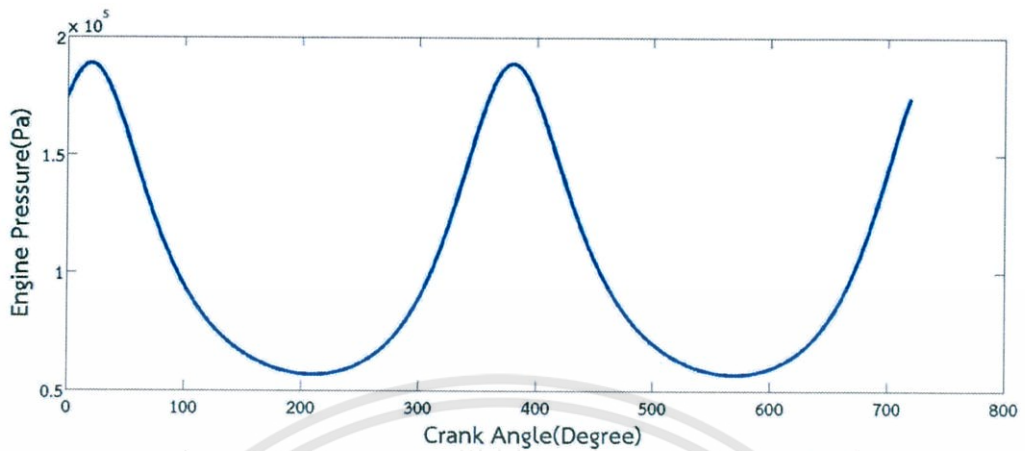
```

รูปที่ 5.2 โค้ด MATLAB สำหรับการวิเคราะห์วัฏจักร

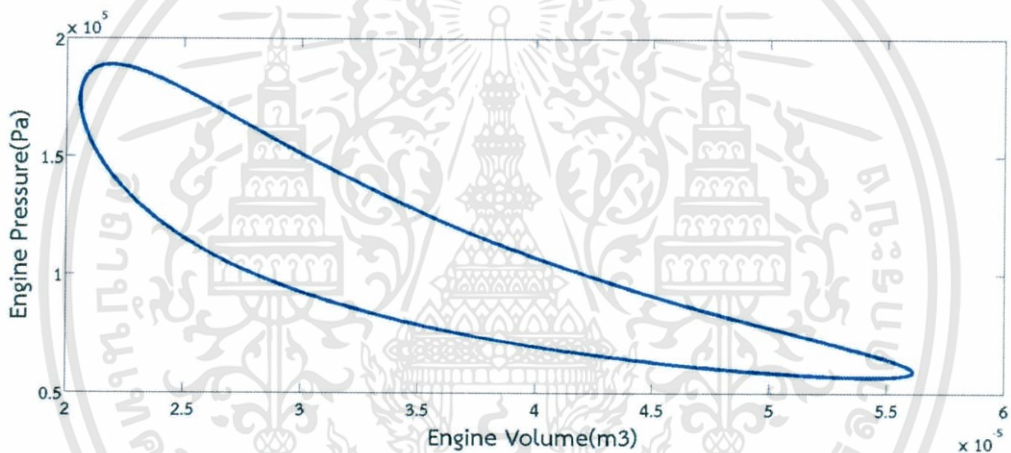


รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของลูกสูบขยายตัว (สีแดง) และลูกสูบอัดตัว (สีน้ำเงิน) เทียบกับมุมของเพลาค้อเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 กราฟความดันของเครื่องยนต์เทียบกับองศาของเพลาช้อเหวี่ยง



รูปที่ 5.5 แผนภาพความดันกับปริมาตรของเครื่องยนต์

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณวัฏจักรของเครื่องยนต์

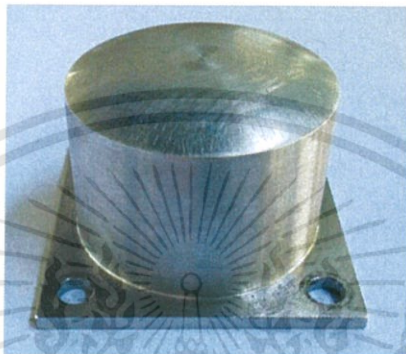
ค่าที่ได้จากวัฏจักร	ขนาด
ความดันสูงสุด, P_{max}	189.37kPa
ความดันต่ำสุด, P_{min}	56.92kPa
ความร้อนป้อน, Q_{in}	2.2026J
ความร้อนถ่ายออก, Q_{out}	-0.8352J
งานสุทธิของวัฏจักร, W_{net}	1.3674J

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ส่วนประกอบและเครื่องยนต์ต้นแบบ

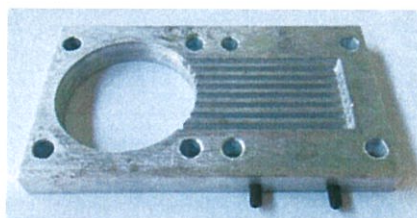
6.1 โดมรับความร้อน



รูปที่ 6.1 โดมรับความร้อน

เป็นชิ้นส่วนสำหรับรับพลังงานความร้อนให้กับเครื่องยนต์ จึงต้องมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการรับความร้อนที่อุณหภูมิสูงและความดัน อีกทั้งในการรับความร้อนนั้นโลหะจะมีการขยายตัว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเค้นสะสม(Residual Stress) ในวัสดุ จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงและทนต่อความล้าเนื่องจากการขยายตัวและหดตัวจากความร้อนได้ วัสดุที่ใช้จึงเลือก Stainless Steel AISI304 และการออกแบบรูปทรงโดมเพื่อให้มีพื้นที่รับความร้อนมากกว่าพื้นที่ทรงกระบอก อีกทั้งลักษณะของโดมจะมีความแข็งแรงต่อความดันและช่วยลดความดันสูญเสียจากการไหล

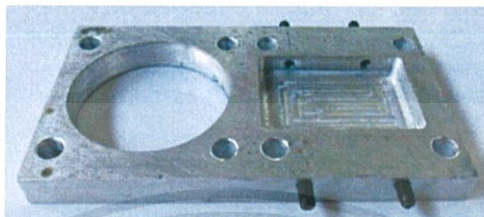
6.2 ส่วนระบายความร้อน



รูปที่ 6.2 ส่วนระบายความร้อน(ด้านหน้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นชิ้นส่วนที่รับความร้อนของสารทำงานและระบายออกสู่ภายนอก ด้านหน้าประกอบด้วยครีบริบความร้อนซึ่งสารทำงานจะไหลผ่านครีบริบนี้และถ่ายเทความร้อนให้ครีบริบด้วยหลักการพาความร้อน จากนั้นจึงนำความร้อนผ่านไปยังอีกด้านหนึ่ง ซึ่งจะมีรางน้ำที่จะพาความร้อนออกไปจากเครื่องยนต์



รูปที่ 6.3 ส่วนระบายความร้อน(ด้านหลัง)

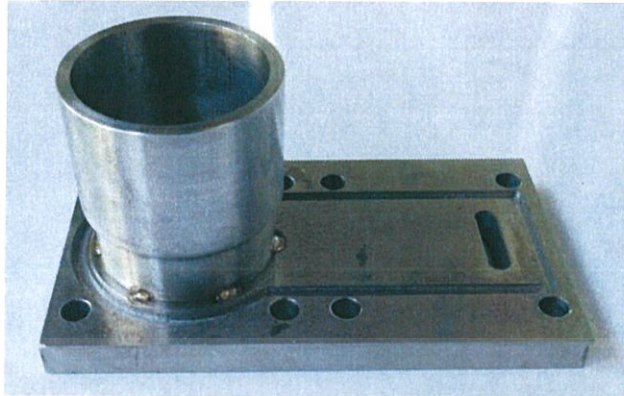
โดยวัสดุที่ใช้ทำจำเป็นที่จะต้องมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดี และไม่จำเป็นต้องมีความแข็งแรงมากนักเนื่องจากไม่ได้มีการรับแรง จึงเลือกใช้ Aluminum alloys 1050 ซึ่งมีราคาถูกและขึ้นรูปได้ง่าย ส่วนระบายความร้อนจะมีแผ่นปิดเพื่อไม่ให้น้ำรั่วออกตามรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แผ่นปิดส่วนระบายความร้อน

6.3 ครอบอกสูบขยายตัว

ครอบอกสูบสำหรับลูกสูบขยายตัวซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่มีความทนความร้อน เนื่องจากจะอยู่ด้านในโดมรับความร้อนวัสดุที่ใช้จึงเลือก Stainless Steel AISI304 ฐานออกแบบเพื่อให้เป็นทางวิ่งของสารทำงาน โดยจะประกบด้านหน้าของส่วนระบายความร้อนตามรูปที่ 6.2 ลงไปซึ่งสารทำงานจะไหลเข้ารูที่เจาะไว้ด้านขวาซึ่งต่อกับลูกสูบอัดตัว



รูปที่ 6.5 ครอบลูกสูบขยายตัว

6.4 ครอบลูกสูบ



รูปที่ 6.6 ครอบลูกสูบ

ครอบลูกสูบควรเป็นวัสดุที่สามารถขัดผิวให้มีความมันลื่นได้ เพื่อลดแรงเสียดทานในครอบลูกสูบ วัสดุที่ออกแบบไว้คือ ASTM A36 แต่เนื่องจากในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาวัสดุนี้ไม่สามารถหาได้ จึงเลือกใช้เหล็กเหนียวนำมาขึ้นรูปและขัดผิวให้มัน

6.5 ลูกสูบขยายตัว

ลูกสูบขยายตัวประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนลูกสูบ และส่วนดิสเพลสเซอร์ ส่วนลูกสูบจะมีขนาดพอดีกับครอบลูกสูบและเคลื่อนที่สัมพันธ์กันซึ่งใช้วัสดุเดียวกับครอบลูกสูบ แต่สำหรับส่วนดิสเพลสเซอร์นั้นต้องมีคุณสมบัติที่ทนความร้อนจึงเลือกใช้ Stainless Steel AISI304 และต้องมีขนาดเล็กกว่าครอบลูกสูบเล็กน้อยเพื่อไม่ให้มีแรงเสียดทาน และส่วนดิสเพลสเซอร์จะมีลักษณะเป็นโดมเพื่อให้สามารถเข้าถึงผิวโค้งของโดมได้เต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 ดิสเพลสเซอร์



รูปที่ 6.8 ลูกสูบขยายตัว

6.6 ลูกสูบอัดตัว

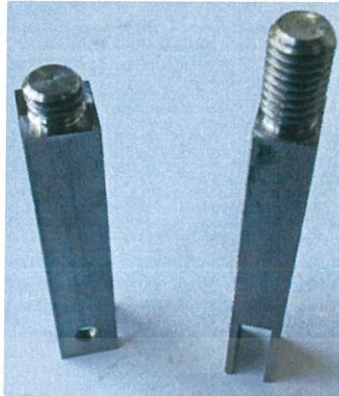
เช่นเดียวกับลูกสูบขยายตัวส่วนล่างคือมีขนาดพอดีและมีวัสดุเดียวกับกระบอกสูบ



รูปที่ 6.9 ลูกสูบอัดตัว

6.7 ก้านสูบ

ก้านสูบจะประกอบเข้ากับลูกสูบโดยการหมุนเกลียว วัสดุที่ใช้คือ Stainless Steel ที่มีความแข็งแรง



รูปที่ 6.10 ก้านสูบ

6.8 ชิ้นส่วนรอสยอร์คแบบปรับปรุง

เป็นชิ้นส่วนขับเคลื่อนกลไกที่สำคัญ ชิ้นส่วนมีลักษณะเป็นรูปทรงแผ่นสามเหลี่ยมและได้ออกแบบร่องสำหรับรองรับการเคลื่อนที่ของลูกสูบ วัสดุที่ใช้คือ Stainless Steel AISI304 เพื่อความแข็งแรง



รูปที่ 6.11 ชิ้นส่วนรอสยอร์คแบบปรับปรุง

6.9 ก้านร็อคเกอร์

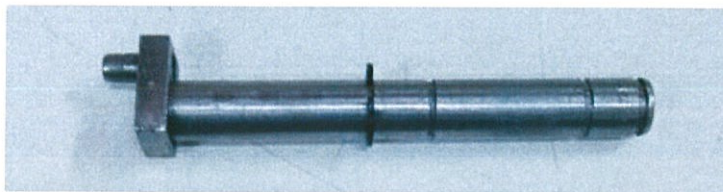
เป็นชิ้นส่วนสำหรับประคองการเคลื่อนที่ของรอสยอร์ค



รูปที่ 6.12 ก้านร็อคเกอร์

6.10 เพลาข้อเหวี่ยง

เป็นเพลาสำหรับรับกำลังจากเครื่องยนต์



รูปที่ 6.13 เพลาข้อเหวี่ยง

6.11 ล้อช่วยแรง

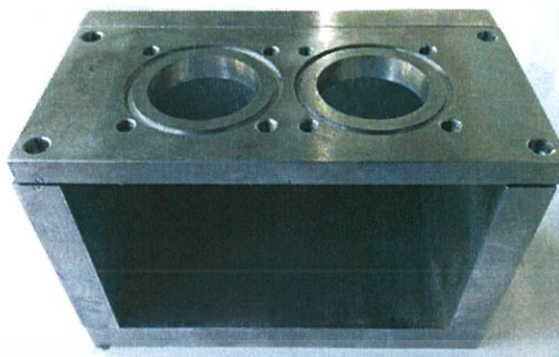
สำหรับเก็บพลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์และนำไปใช้ในจังหวะอัดตัวและทำให้ลักษณะความเร็วในการทำงานของเครื่องยนต์มีความเสถียร



รูปที่ 6.14 ล้อช่วยแรง

6.12 กล่องห้องเครื่อง

กล่องสำหรับห้องกลไกและเป็นฐานของเครื่องยนต์



รูปที่ 6.15 ก่อหล่องทองกลไก

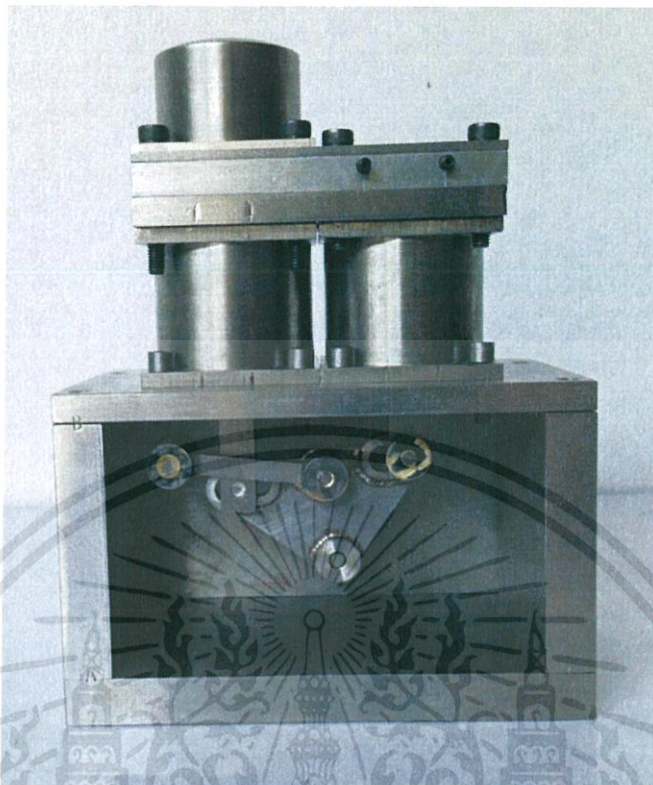
6.13 เครื่องยนต์ต้นแบบ

การประกอบเครื่องยนต์ต้นแบบนั้นได้แสดงตำแหน่งและการประกอบแต่ละชิ้นส่วนไว้ดังรูปที่ 6.15 และได้เครื่องยนต์ต้นแบบสำหรับการศึกษาดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 ภาพแสดงตัวอย่างการประกอบกลไก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 เครื่องยนต์ต้นแบบ

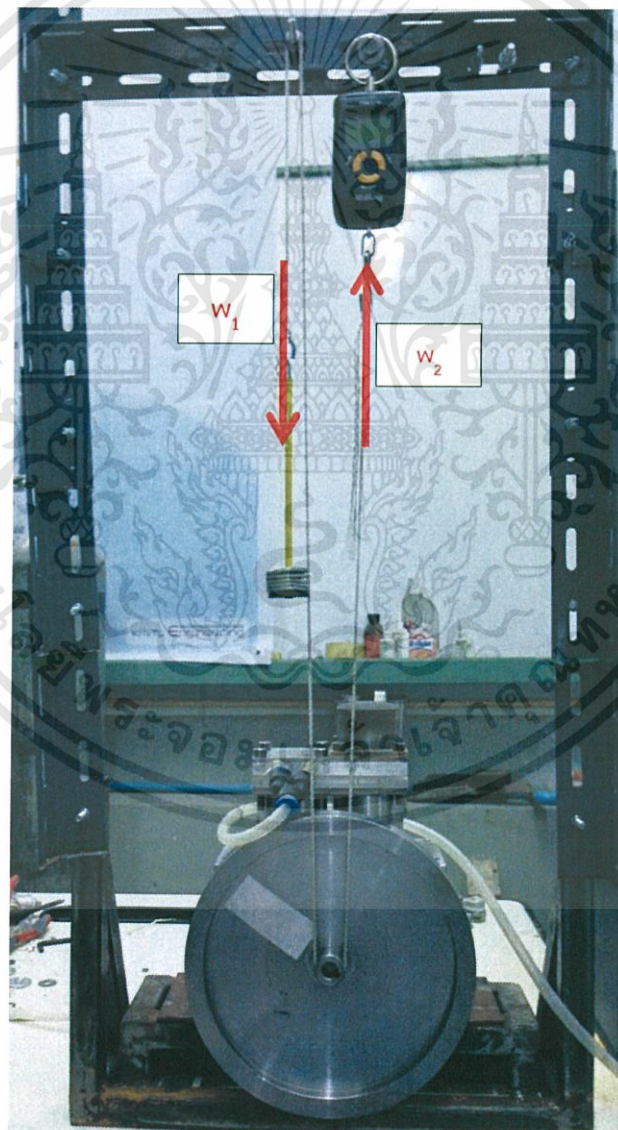
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สมรรถนะของเครื่องยนต์

7.1 การทดสอบสมรรถนะ

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์นั้นจะทำการทดสอบเพื่อหาค่าแรงบิด, ความเร็วรอบและกำลังของเครื่องยนต์ โดยวิธีการทดสอบนั้นจะใช้ชุดทดสอบแบบโรปเบรก(Rope Brake) สำหรับการทดสอบ



รูปที่ 7.1ชุดทดสอบแบบโรปเบรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.1 วิธีการทดสอบ

- 1 ทำการให้พลังงานความร้อนในอัตราคงที่ และค่อยๆ ให้แรงกระตุ้นให้เครื่องยนต์ทำงาน จนกระทั่งเครื่องยนต์เริ่มทำงาน
- 2 ใช้เครื่องวัดรอบทำการวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ให้สังเกตค่าความเร็วจนกระทั่งความเร็วคงที่ที่ค่าใดค่าหนึ่งซึ่งค่านั้นคือ ความเร็วรอบสูงสุดของเครื่องยนต์
- 3 แขนวนเชือกให้คาคับเพลาวัดแรง โดยให้ด้านที่ใส่น้ำหนักอยู่ฝั่งเดียวกับทิศทางที่เครื่องยนต์หมุน
- 4 ให้ใส่ตุ้มน้ำหนักลงไปในปริมาณที่ตั้งไว้แล้วทำการรอสักครู่ อ่านค่าแรงดึงเชือกที่เครื่องวัดแรงและวัดความเร็วรอบ
- 5 เพิ่มน้ำหนักขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละครั้งและทำการอ่านค่าตามขั้นตอนที่ 6.1.1.4 จนกระทั่งเครื่องยนต์หยุดทำงาน

7.1.2 หลักการคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์

หลักการของการวัดด้วยโรปเบรกนั้นจะหาแรงบิดได้จากภาระที่เราป้อนให้กับเครื่องยนต์ ซึ่งในที่นี้คือตุ้มน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบจะนำมาคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์จะเริ่มจากการหาแรงที่กระทำกับเครื่องยนต์

$$F = (w_1 - w_2) \times g \quad (7.1)$$

เมื่อ	F	คือ แรงของเครื่องยนต์, N
	w_1	คือ น้ำหนักของตุ้มน้ำหนักที่ให้, kg
	w_2	คือ แรงดึงเชือกที่อ่านได้จากเครื่องวัด, kg
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ 9.81 m/s^2

จากนั้นจึงนำแรงนี้มาคำนวณเปลี่ยนเป็นแรงบิดของเครื่องจาก

$$T = F \times r \quad (7.2)$$

เมื่อ	T	คือ แรงบิดของเครื่องยนต์, N.m
-------	-----	-------------------------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r คือ รัศมีของเพลาวัด, m
และสุดท้ายจึงคำนวณหาค่ากำลังของเครื่องยนต์

$$P = 2\pi \times T \times \frac{N}{60} \quad (7.3)$$

เมื่อ P คือ กำลังของเครื่องยนต์, W
 N คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, RPM

7.2 ผลการทดสอบ

การทดสอบได้ใช้ก๊าซ LPG เป็นแหล่งพลังงานความร้อน โดยมีอัตราการไหลของก๊าซที่ 0.6 kg/hr และเครื่องยนต์ทำงานที่ความดันบรรยากาศ จากนั้นจึงนำผลการทดสอบที่ดีที่สุด 3 ครั้งมาทำการหาค่าเฉลี่ยและได้ผลการทดสอบตามตารางที่ 7.1

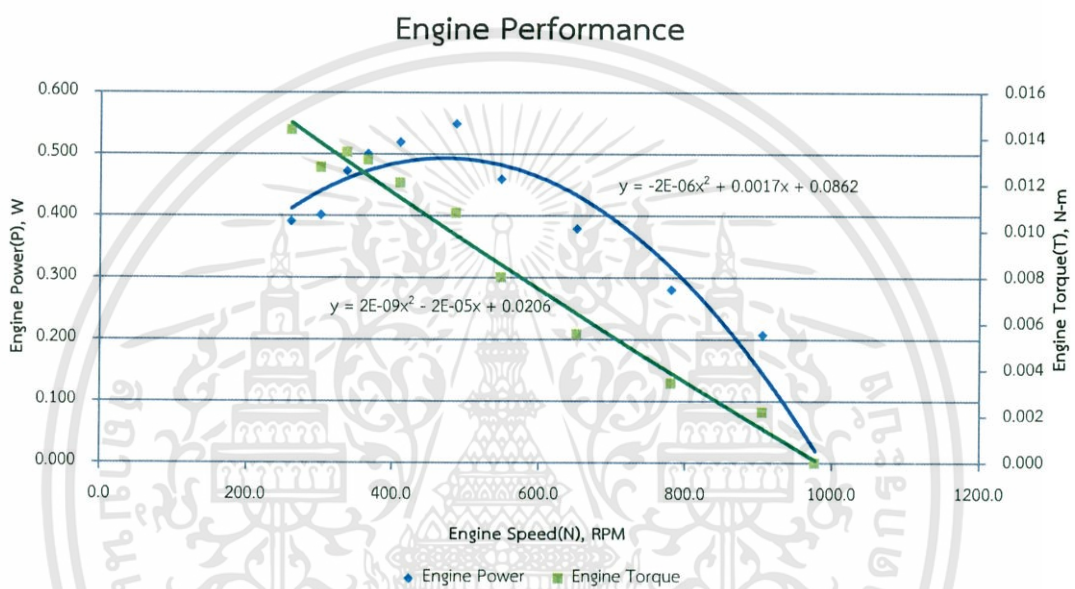
ตารางที่ 7.1 ตารางบันทึกผลการทดสอบเครื่องยนต์

w_1	w_2	F	T	N	P
0.000	0.000	0.000	0.000	977.4	0.000
0.050	0.028	0.219	0.002	905.5	0.208
0.100	0.065	0.343	0.003	781.2	0.281
0.150	0.093	0.556	0.006	651.8	0.379
0.200	0.118	0.801	0.008	548.0	0.460
0.250	0.140	1.079	0.011	486.3	0.549
0.300	0.177	1.210	0.012	410.1	0.520
0.350	0.217	1.308	0.013	365.8	0.501
0.400	0.263	1.341	0.013	336.7	0.473

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1 ตารางบันทึกผลการทดสอบเครื่องยนต์(ต่อ)

w_1	w_2	F	T	N	P
0.450	0.320	1.275	0.013	300.9	0.402
0.500	0.353	1.439	0.014	260.0	0.392



7.3 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบผลที่ได้คือเครื่องยนต์มีกำลังสูงสุดที่เท่ากับ 0.549 W ที่ความเร็วรอบ 486 RPM, แรงบิดสูงสุดเท่ากับ 0.014 N.m ที่ความเร็วรอบ 260 RPM และความเร็วรอบสูงสุดคือ 977 RPM

กำลังของเครื่องยนต์นั้นมีย่าน้อยมาก เนื่องจากการให้ความร้อนนั้นยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรเนื่องจากการไม่มีการออกแบบเตาให้ความร้อนโดยเฉพาะ อีกทั้งเนื่องจากเครื่องยนต์มีวัสดุประสงค์เพื่อทดสอบลักษณะการทำงานของกลไกทำให้มีขนาดใหญ่แต่แข็งแรง พลังงานจึงมีการสูญเสียเพื่อขับเคลื่อนกลไก

บทที่ 8

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

8.1 สรุป

การดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์ กลไกแบบปรับปรุงที่ได้ออกแบบนั้นสามารถควบคุมให้การเคลื่อนที่ของลูกสูบและก้านสูบเป็นเส้นตรงได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งได้พิสูจน์ถึงผลข้อนี้จากการที่ได้ทดสอบเครื่องยนต์โดยการให้ความร้อนซึ่งพบว่า เครื่องยนต์ต้นแบบที่ได้ทำการสร้างเพื่อทดสอบนั้นสามารถทำงานโดยมีกลไกนี้เป็นชุดส่งกำลังได้เป็นอย่างดี

8.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องยนต์ต้นแบบนี้ยังมีกำลังน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการที่วัตถุประสงค์หลักนั้น คือการทดสอบลักษณะการทำงานของกลไก จึงทำให้กลไกมีขนาดใหญ่แต่แข็งแรง อีกทั้งยังไม่ได้มีการออกแบบเตาให้ความร้อนหรือการเพิ่มความดันทำงาน จึงเสนอแนะสำหรับการพัฒนาในอนาคต ว่าควรออกแบบเตาให้ความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ อีกทั้งยังทำให้ผลการทดสอบมีความแม่นยำมากขึ้น และการออกแบบกล่องห้องกลไกเพื่อให้สามารถอัดความดันได้จะช่วยให้เพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ได้

กลไกนี้ยังไม่ได้มีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกลไกเทียบกับแบบดั้งเดิม การสร้างกลไกแบบดั้งเดิมเพื่อนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์นี้ จะทำให้ได้ผลมาเปรียบเทียบในเชิงประสิทธิภาพทางกลได้ จึงเป็นข้อเสนอแนะเพื่อให้สามารถที่จะหาจุดแตกต่างเพื่อเป็นการพัฒนากลไกและเครื่องยนต์ต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] C. D. West, *Principles and Applications of Stirling Engines*: VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY, 1986.
- [2] H.-S. Y. Chin-Hsiang Cheng “Optimization of geometrical parameters for Stirling engines based,” *ELSEVIER*, pp. 395-405, 2011.
- [3] Y.-J. Y. Chin-Hsiang Cheng, “Dynamic simulation of a beta-type Stirling engine with cam-drive mechanism via the combination of the thermodynamic and dynamic models,” *ELSEVIER*, pp. 714-725, 2011.
- [4] A. Ross, *Making Stirling Engines* Andy Ross, 2011.
- [5] H. CARLSEN, *A STIRLING MACHINE*, United State, DKStirling, 1996.
- [6] C.M. HARGREAVES, *THE PHILIPS STRING ENGINE*, pp. 359-360: Elsevier Science Publishing Company inc., 1991.
- [7] N. K. Koichi Hirata, Makoto Takeuchi, Iwao Yamashita, Naotsugu Isshiki, Kazuhiro Hamaguchi, “Test Result of Applicative 100 W Stirling Engine.”
- [8] A. J. G. Yunus A. Cengel, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 4th ed.: McGraw-Hill, 2011.
- [9] R. L. Norton, *Machine Design : An Integrated Approach*, 4th ed.: PEARSON, 2010.
- [10] S. e. A. M. Iskander Tlili “Thermodynamic evaluation of a second order simulation for Yoke Ross Stirling Engine,” *ELSEVIER*, pp. 149-160, 2013.



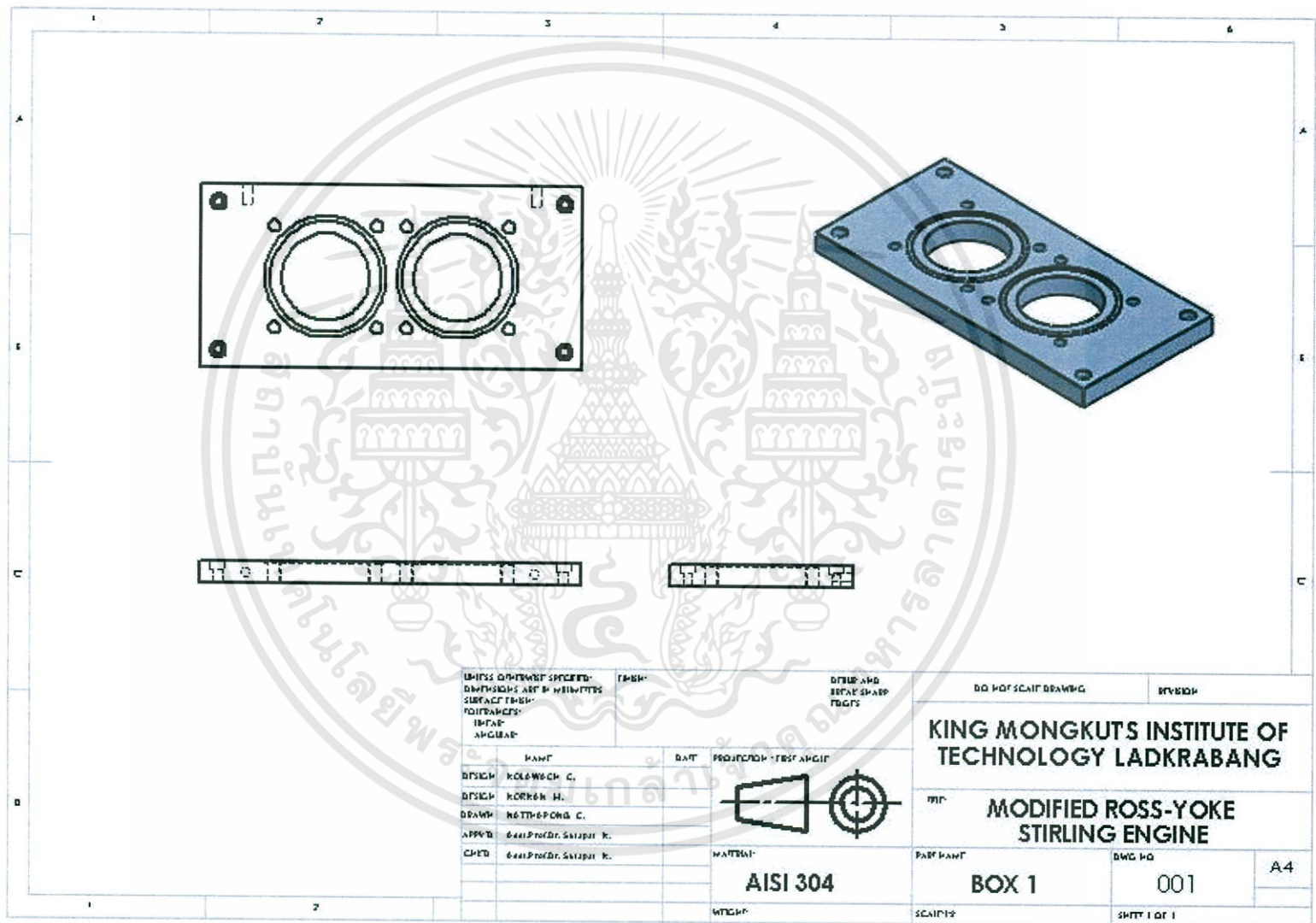
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ต้นแบบ

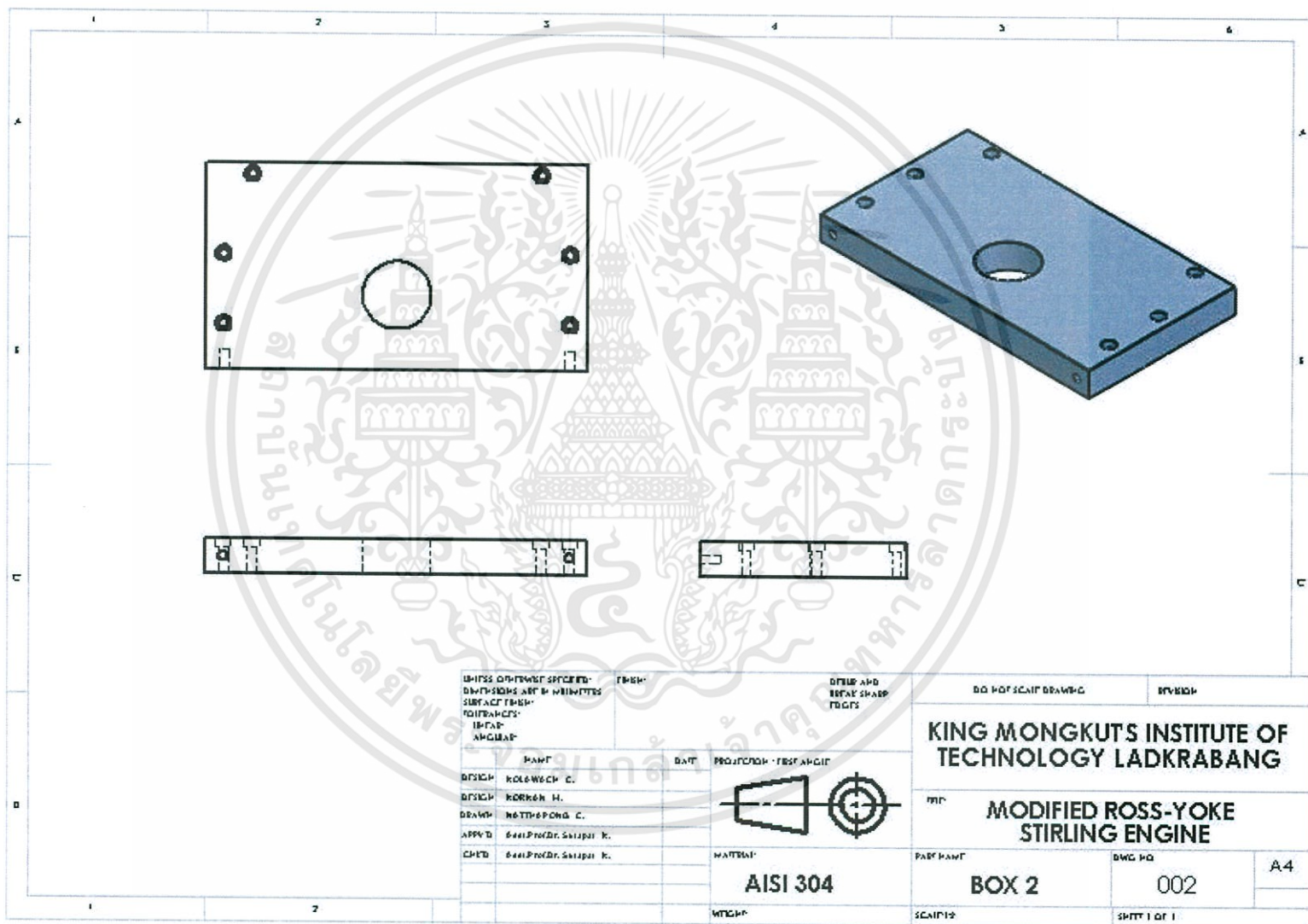
ลำดับ	ชื่อ	วัสดุ	จำนวน
1	กล่อง 1	ASTM A36	1
2	กล่อง 2	ASTM A36	1
3	กล่อง 3	ASTM A36	1
4	กล่อง 4	ASTM A36	1
5	กล่อง 5	ASTM A36	1
6	ลูกสูบอัดตัว	ASTM A36	1
7	ส่วนระบายความร้อน	AISI 304	1
8	แผ่นปิดส่วนระบายความร้อน	AISI 304	1
9	เพลาช้อเหวี่ยง	AISI 304	1
10	ฐานกระบอกสูบขยายตัว	AISI 304	1
11	กระบอกสูบขยายตัว,อัดตัว	ASTM A36	2
12	ลูกสูบขยายตัว	ASTM A36	1
13	ตัวเชื่อมกระบอกสูบขยายตัว	ASTM A36	1
14	ดิสเพลสเซอร์	ASTM A36	1
15	ล้อช่วยแรง	ASTM A36	1
16	โคมรับความร้อน	AISI 304	1
17	ก้านสูบฝักอัดตัว	AISI 304	1
18	ก้านสูบฝักขยายตัว	AISI 304	1
19	ตัวยึดก้านลือกเกอร์	AISI 304	1
20	ก้านลือกเกอร์	AISI 304	1
21	รอสยอร์คแบบปรับปรุง	AISI 304	1
22	สตัสมเกิ้ล	AISI 304	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

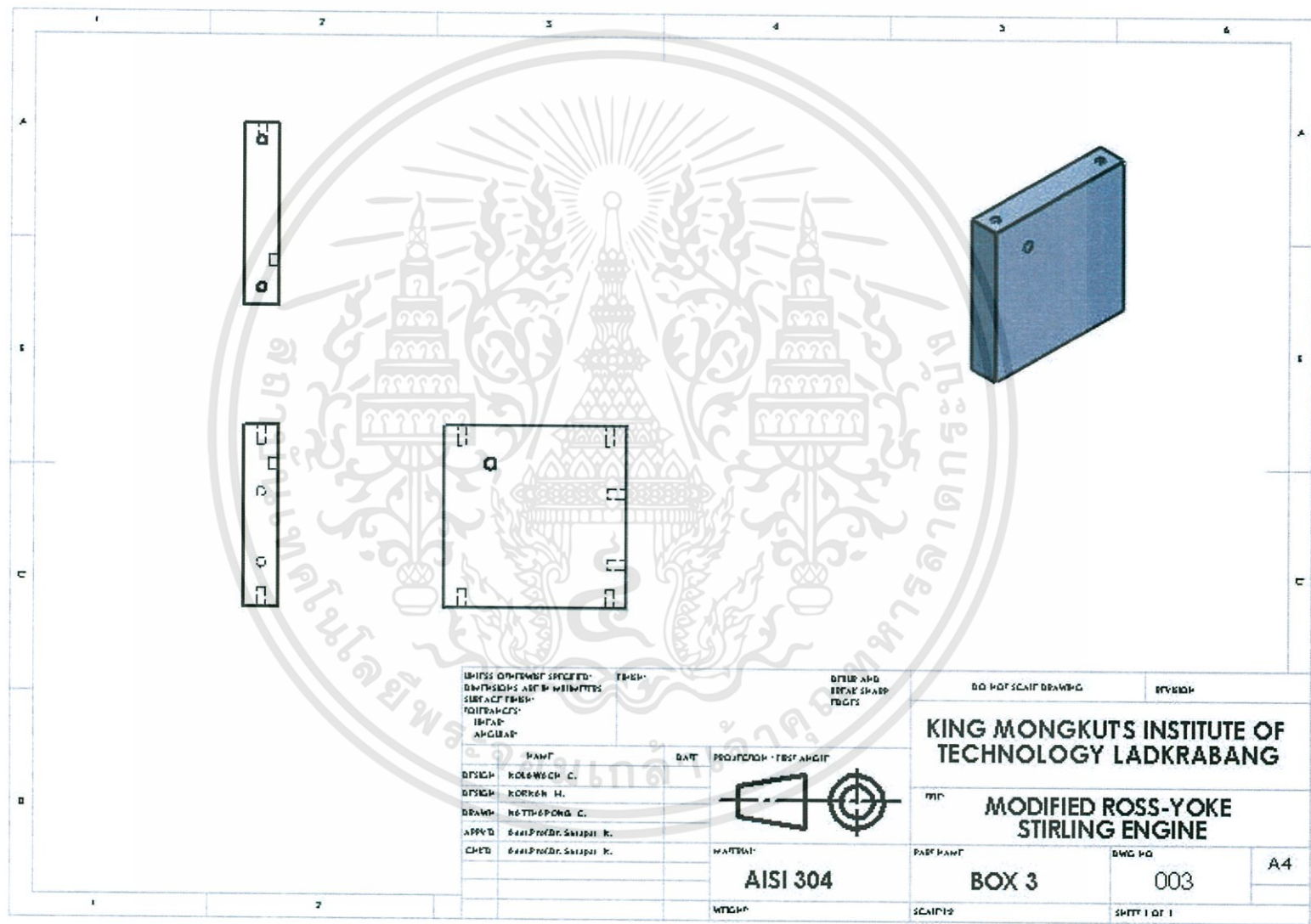
รูปที่ ก.1.กล่อง 1



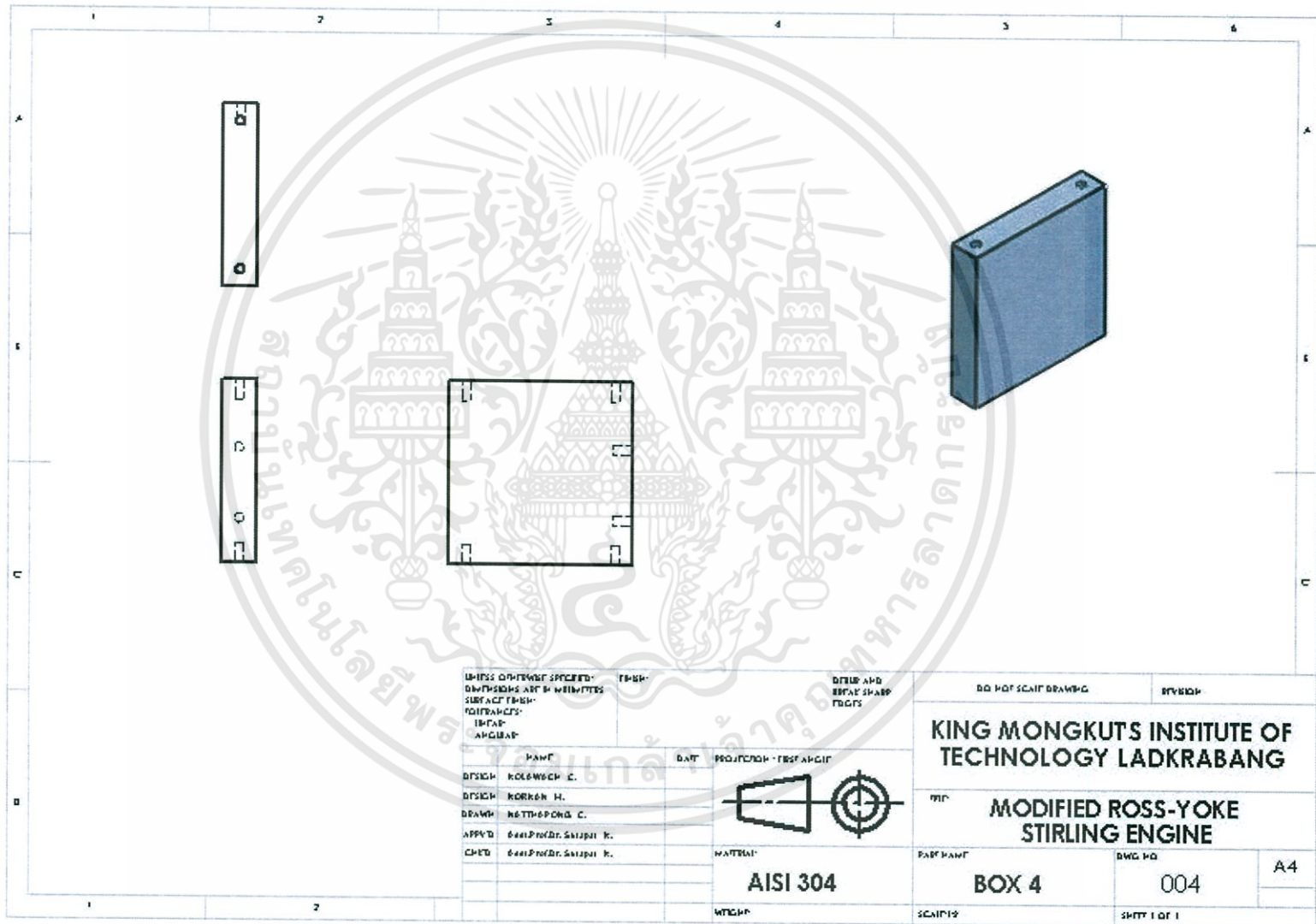
รูปที่ ก.2หน้า๑2



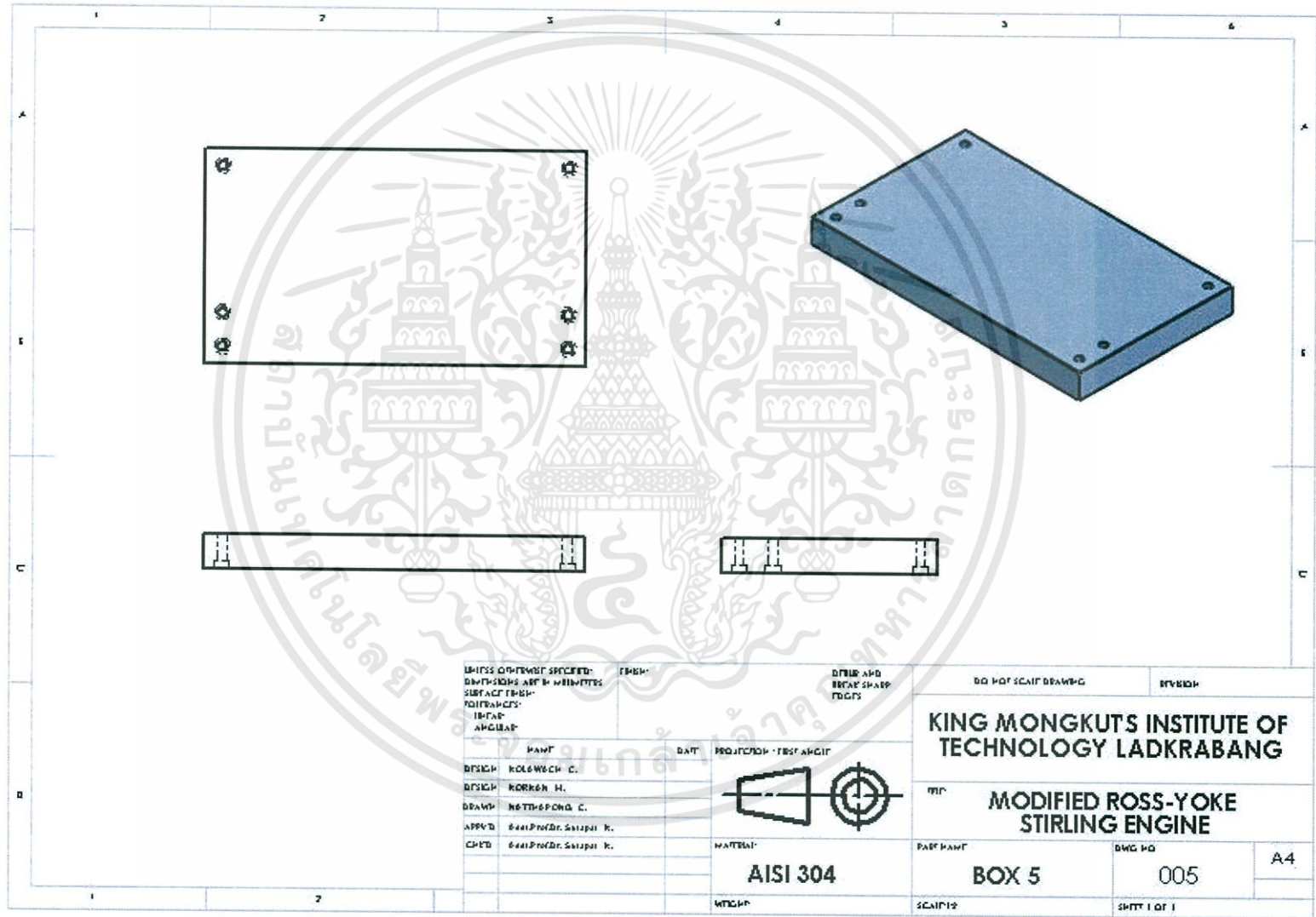
รูปที่ 3.กล่อง 3



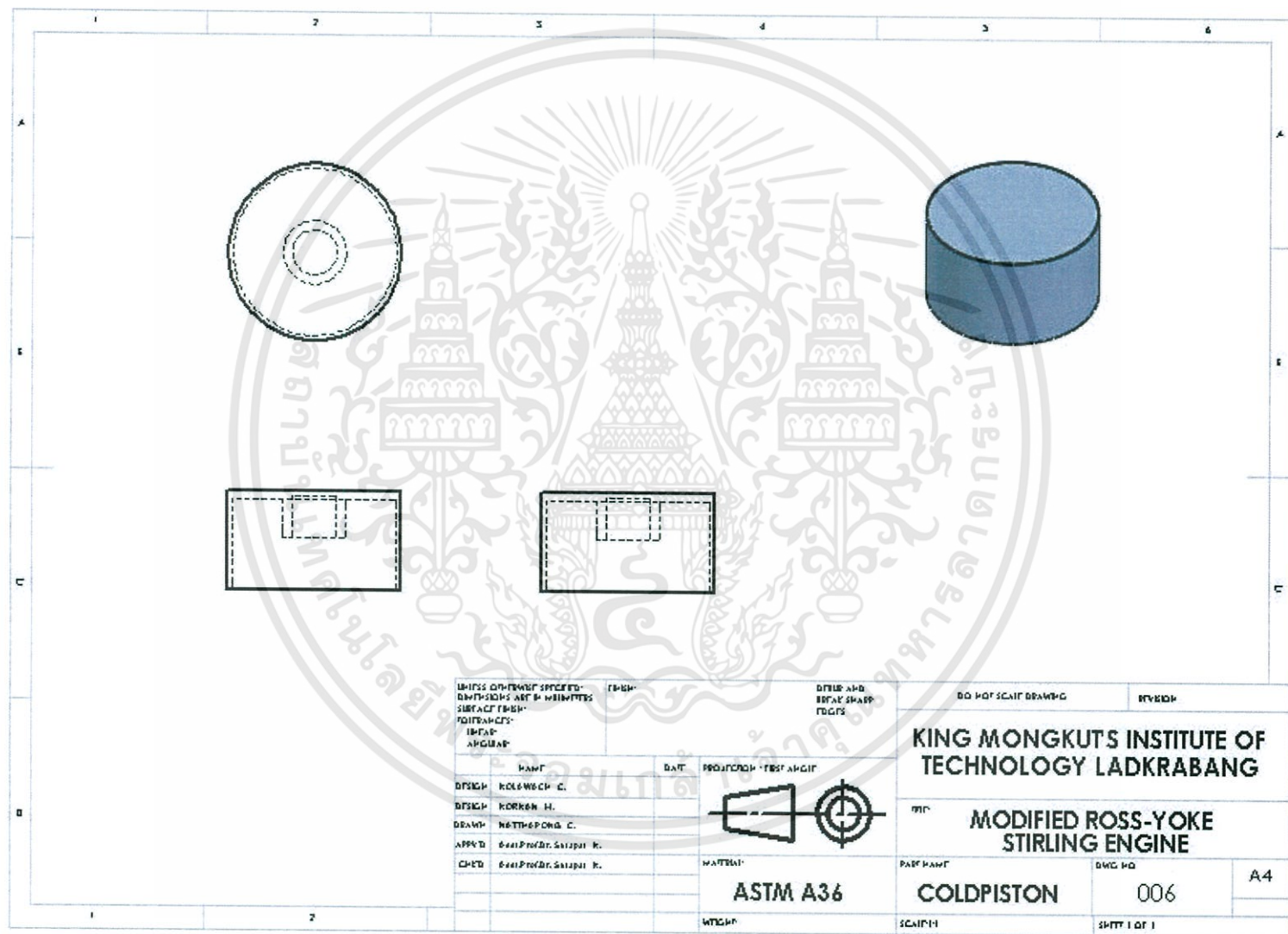
รูปที่ ก.4กลอง4



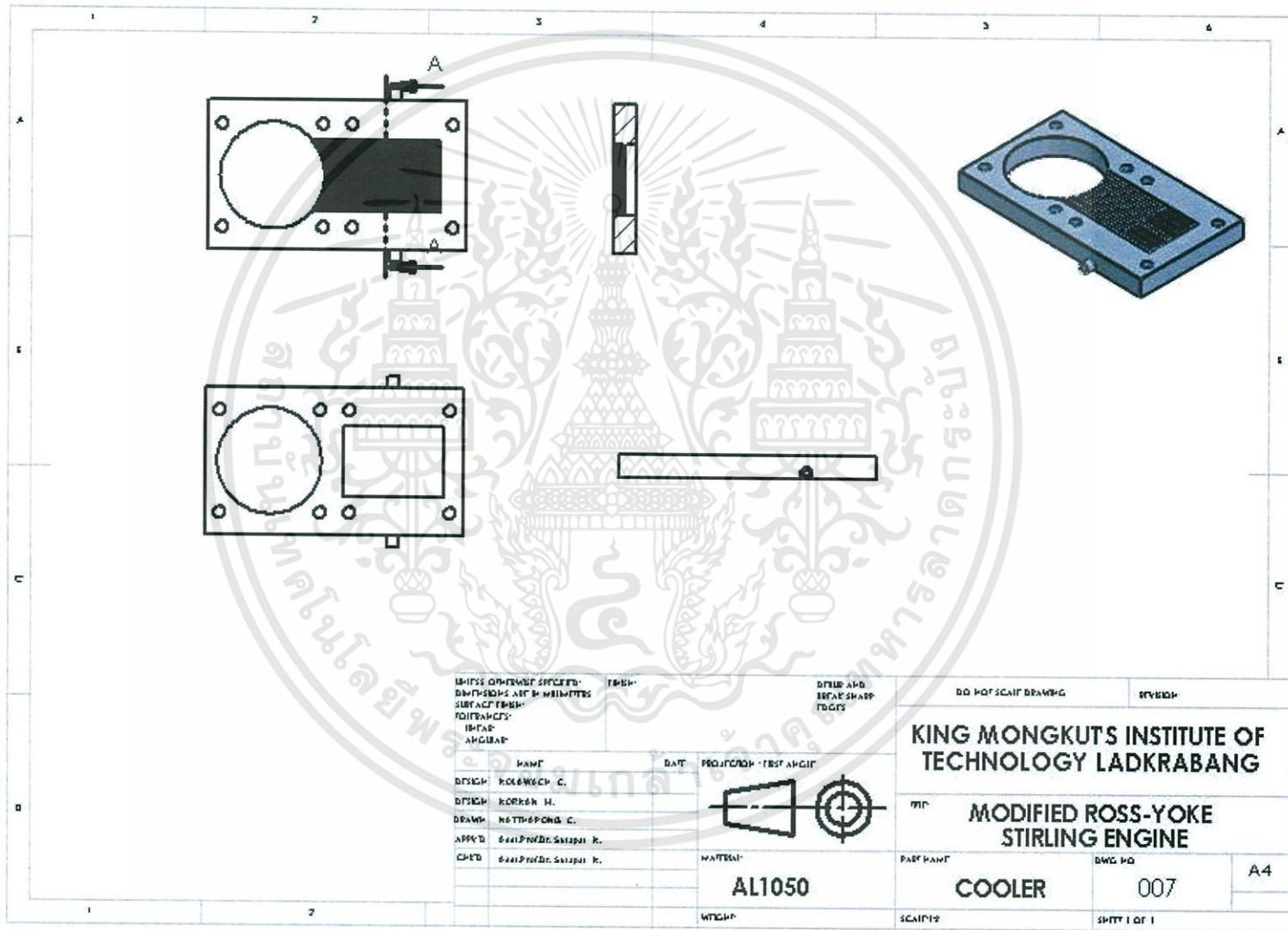
รูปที่ 5.5กล่อง



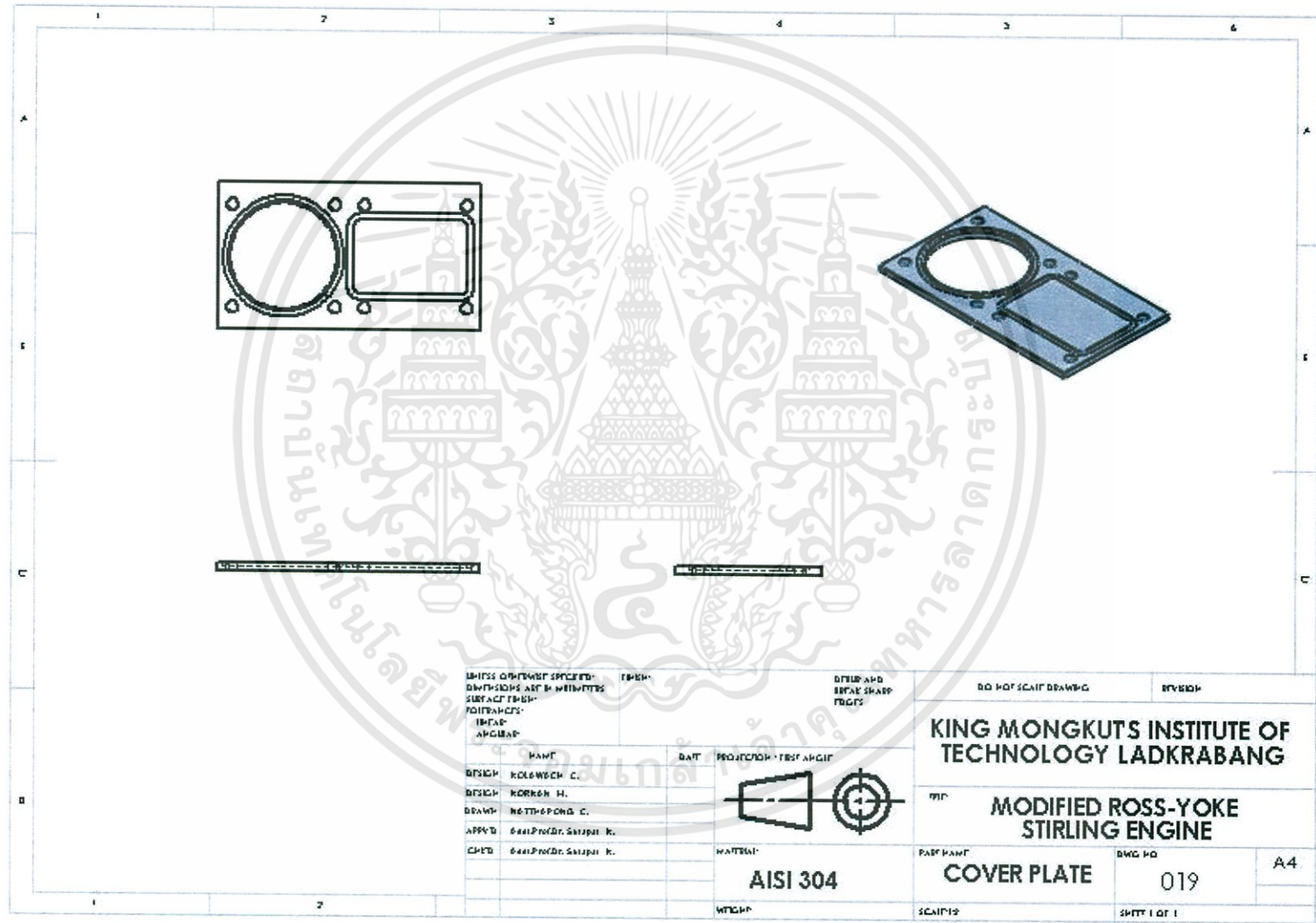
รูปที่ ก.6 ลูกสูบอัดตัว



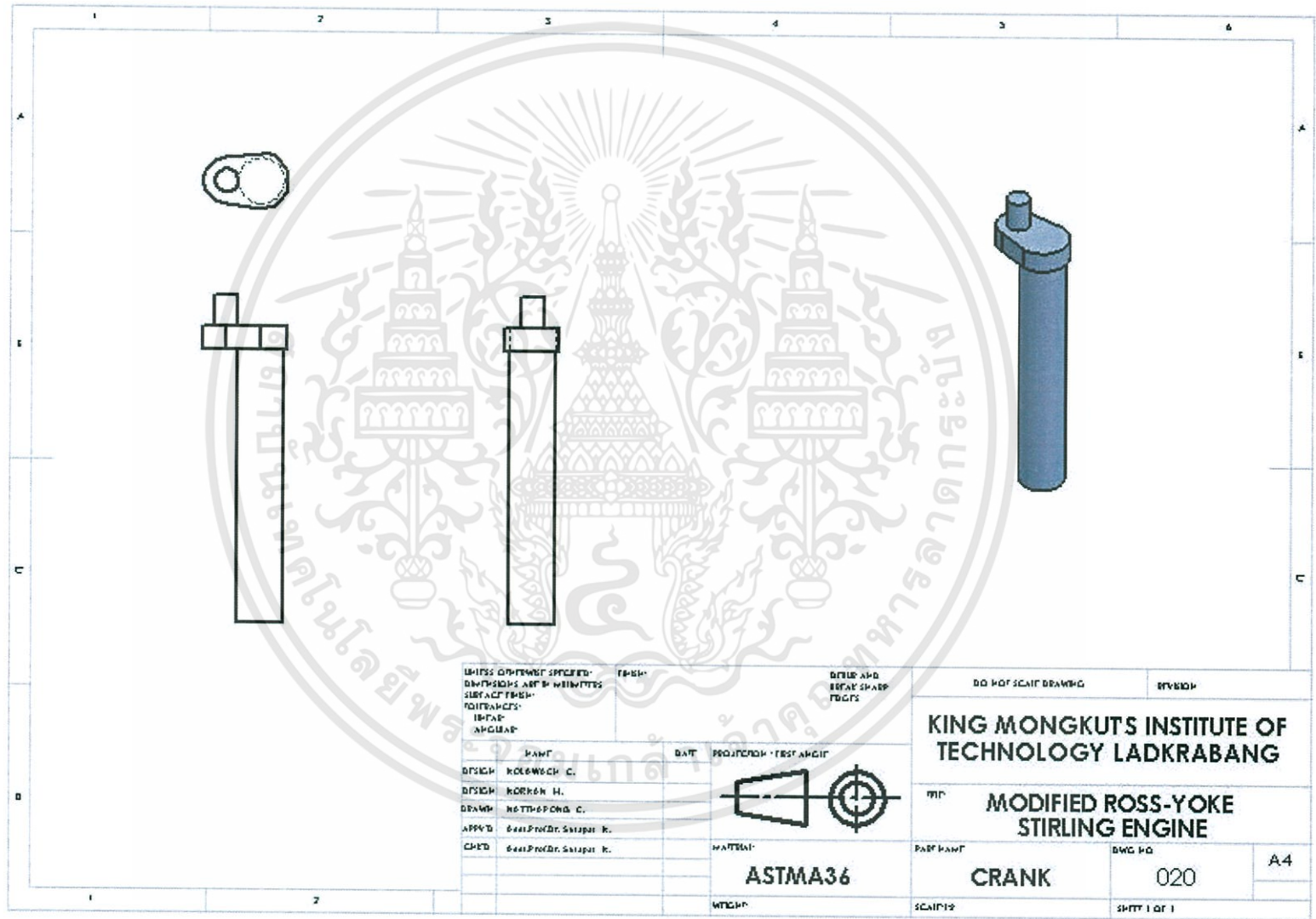
รูปที่ ก.7 ส่วนระบายนํ้าความร้อน

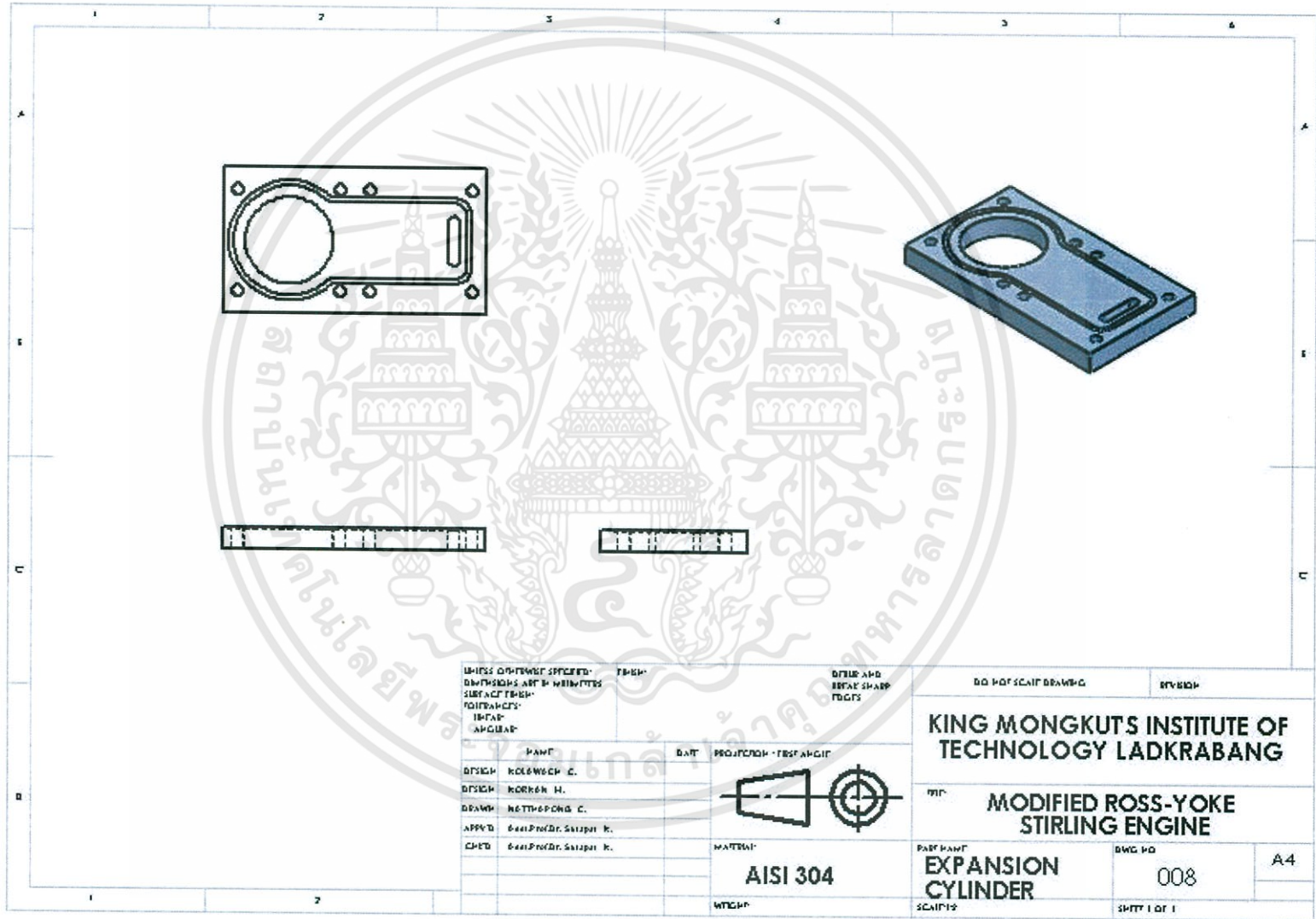


รูปที่ 8.8 แผนเขียนรายละเอียดการรื้อถอน

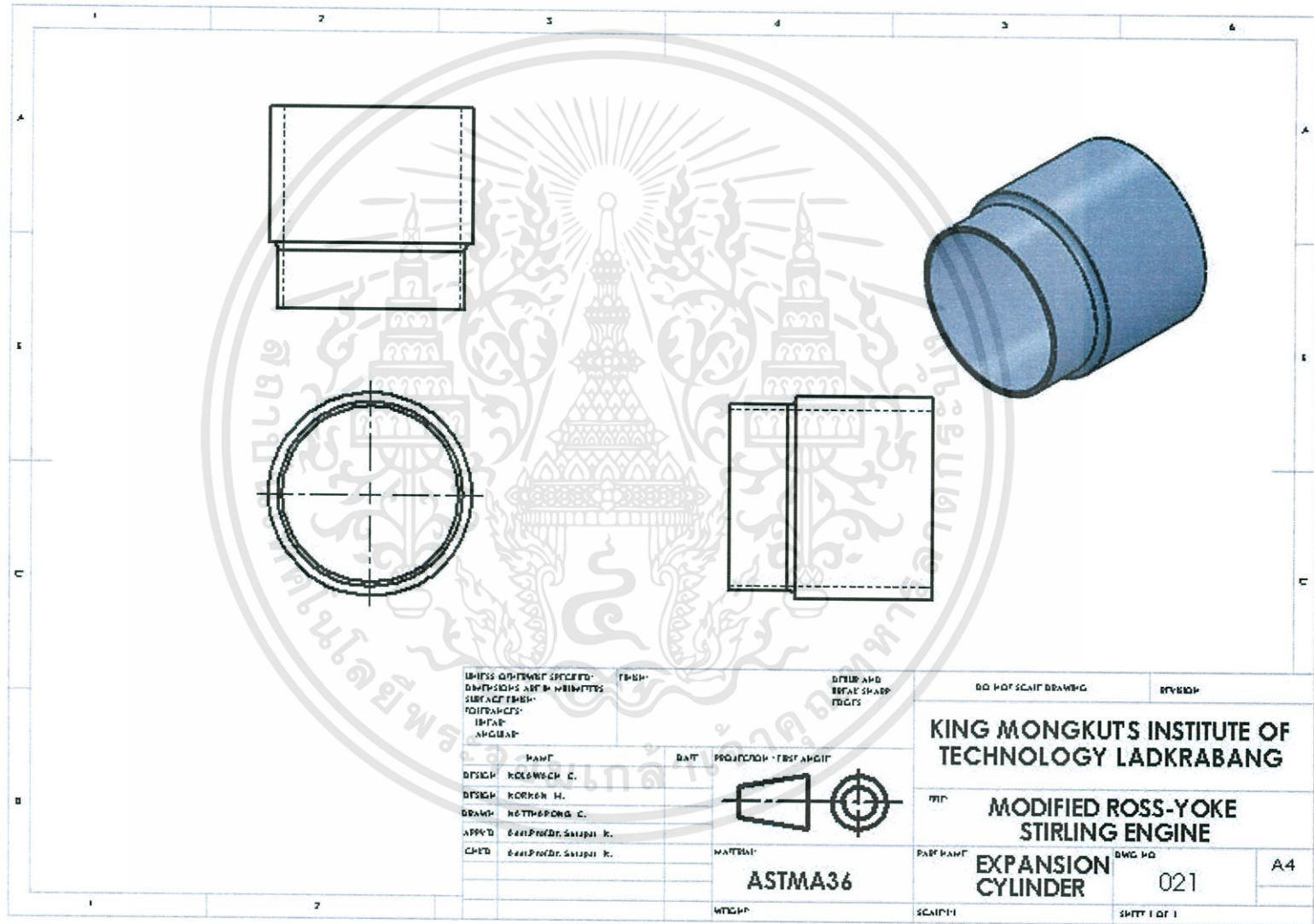


รูปที่ ๑.9 เพลลาข้อเหวี่ยง

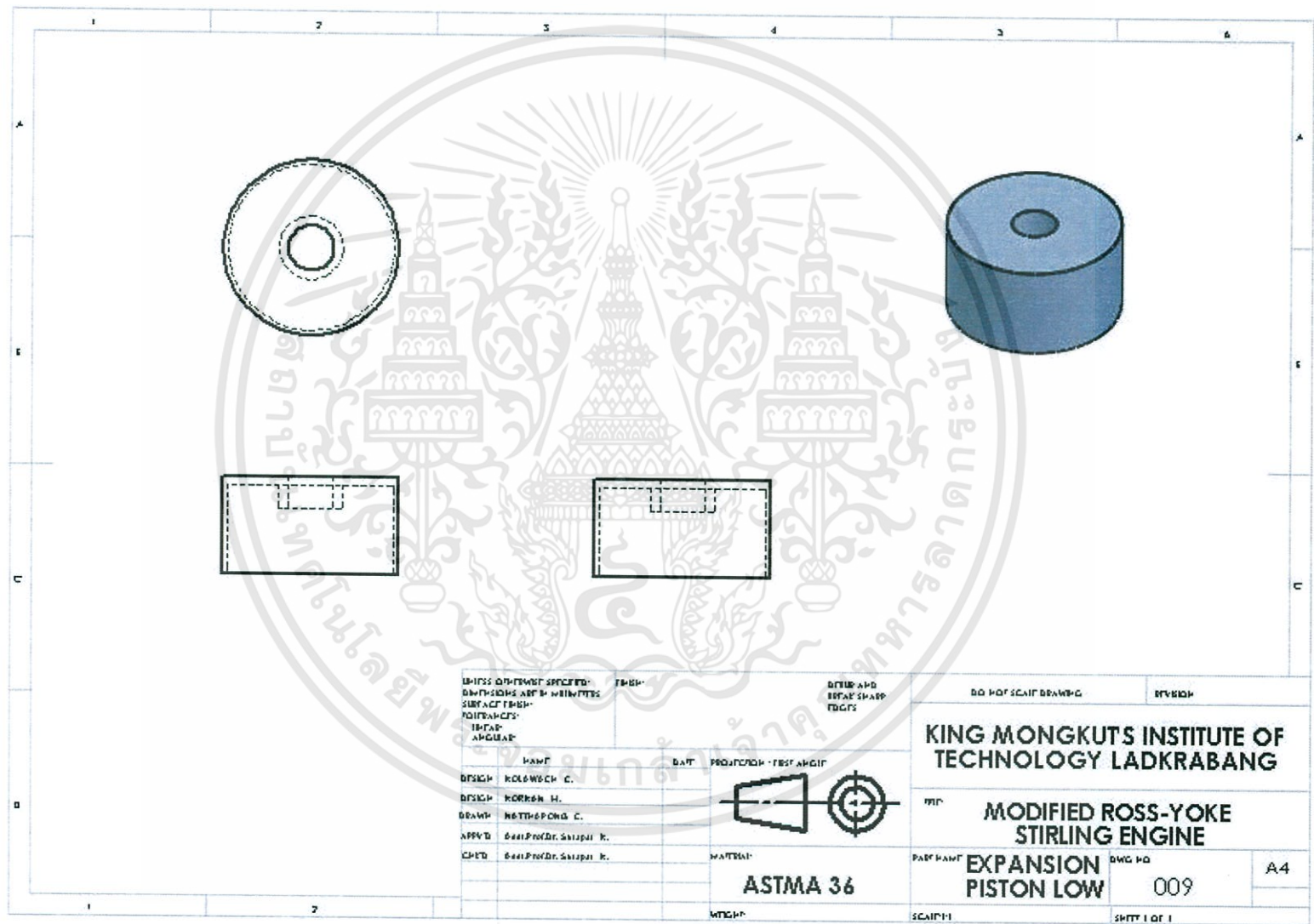




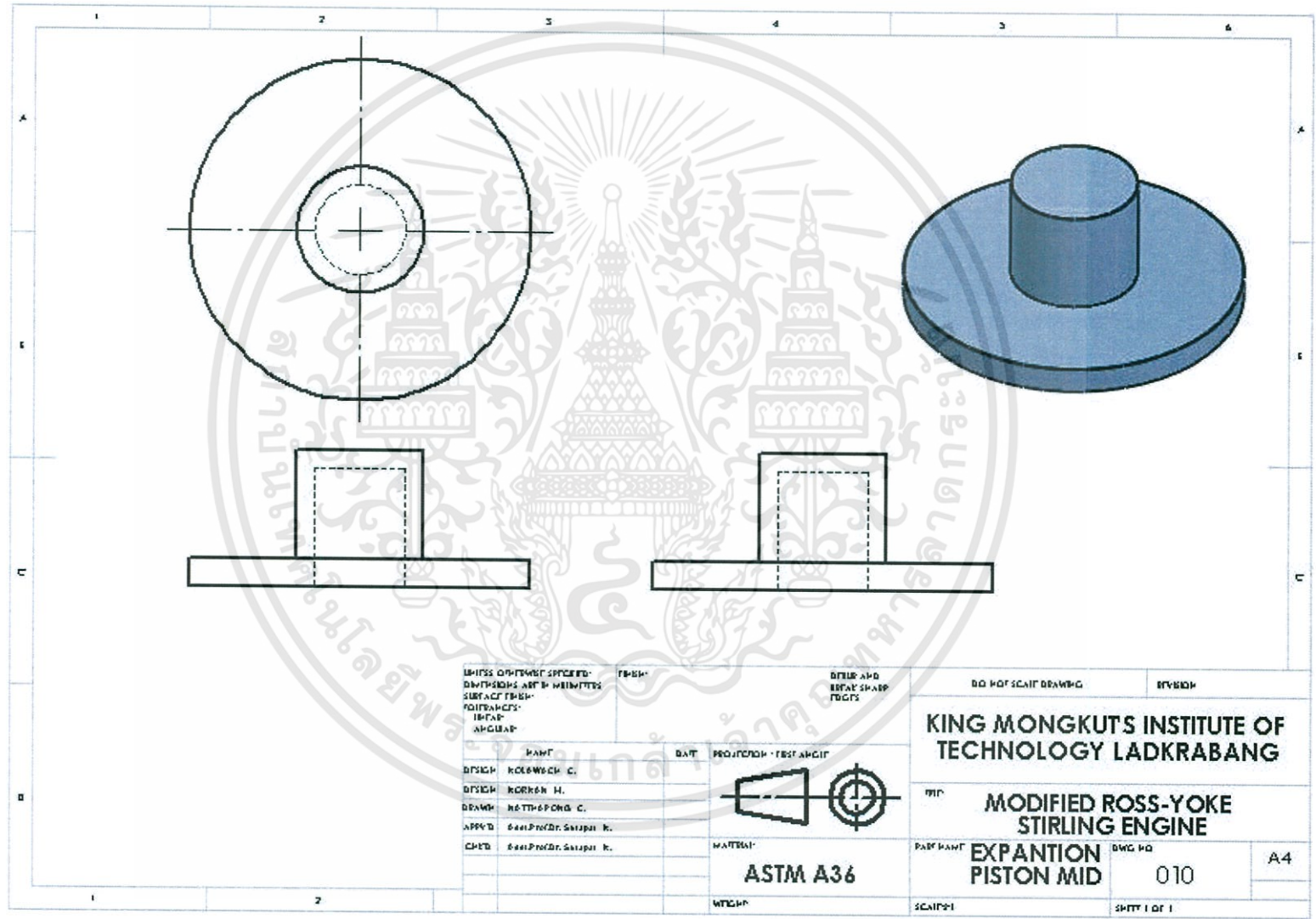
รูปที่ ก.11 กระบอกสูบขยายตัว



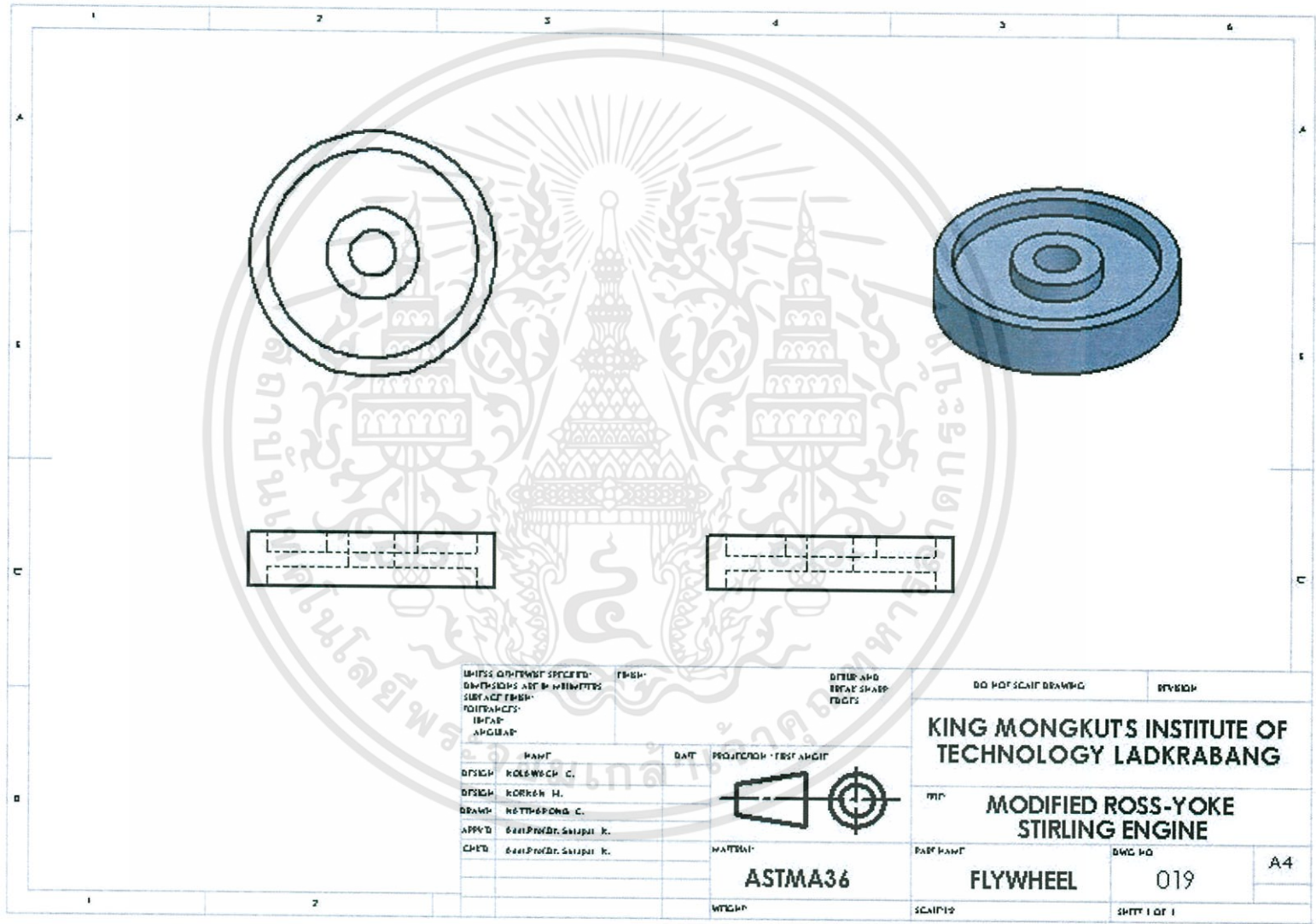
รูปที่ ก.12 ลูกสูบขยายตัว



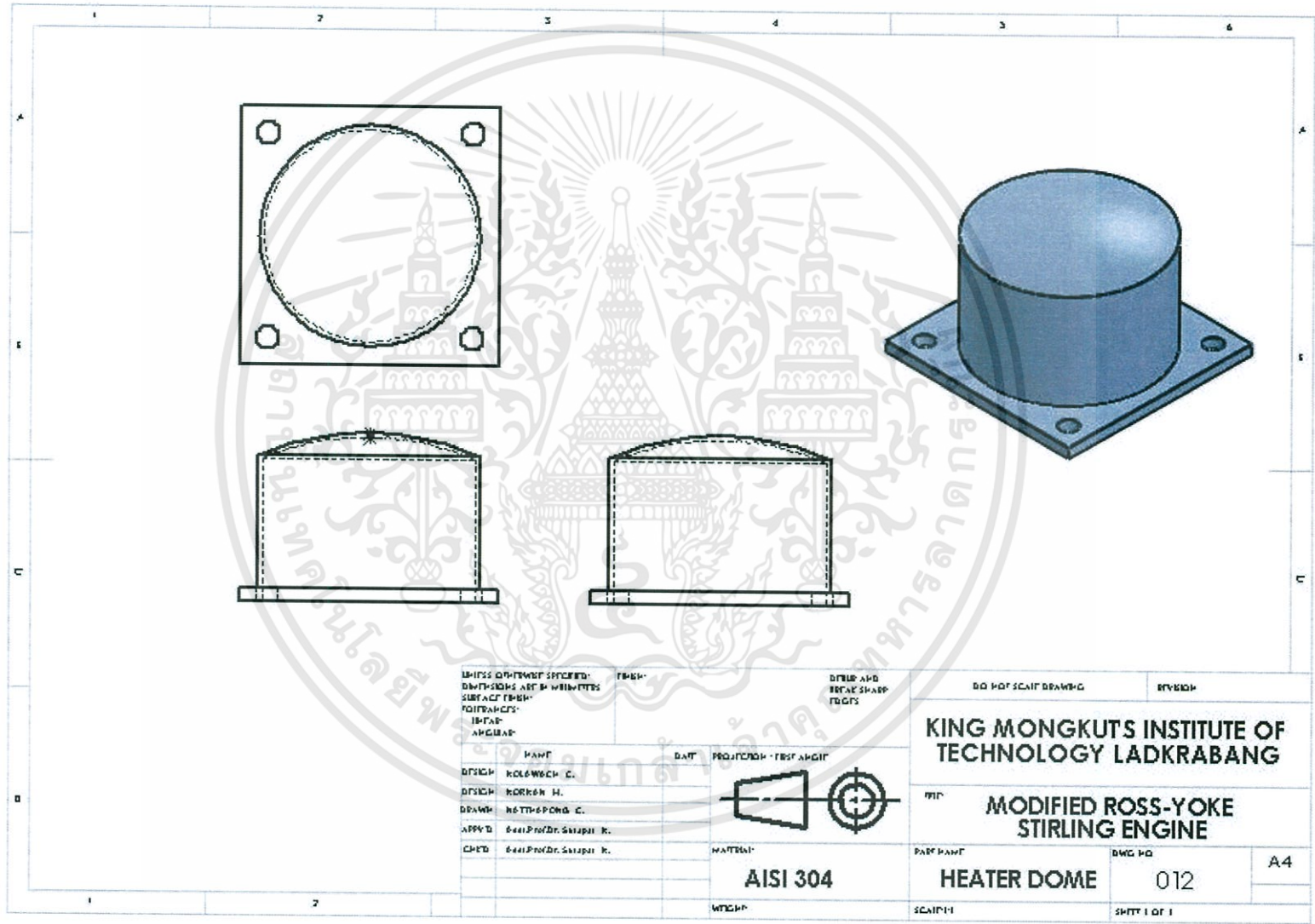
รูปที่ ก.13 ตัวเชื่อมกระบอกสูบภายนอก



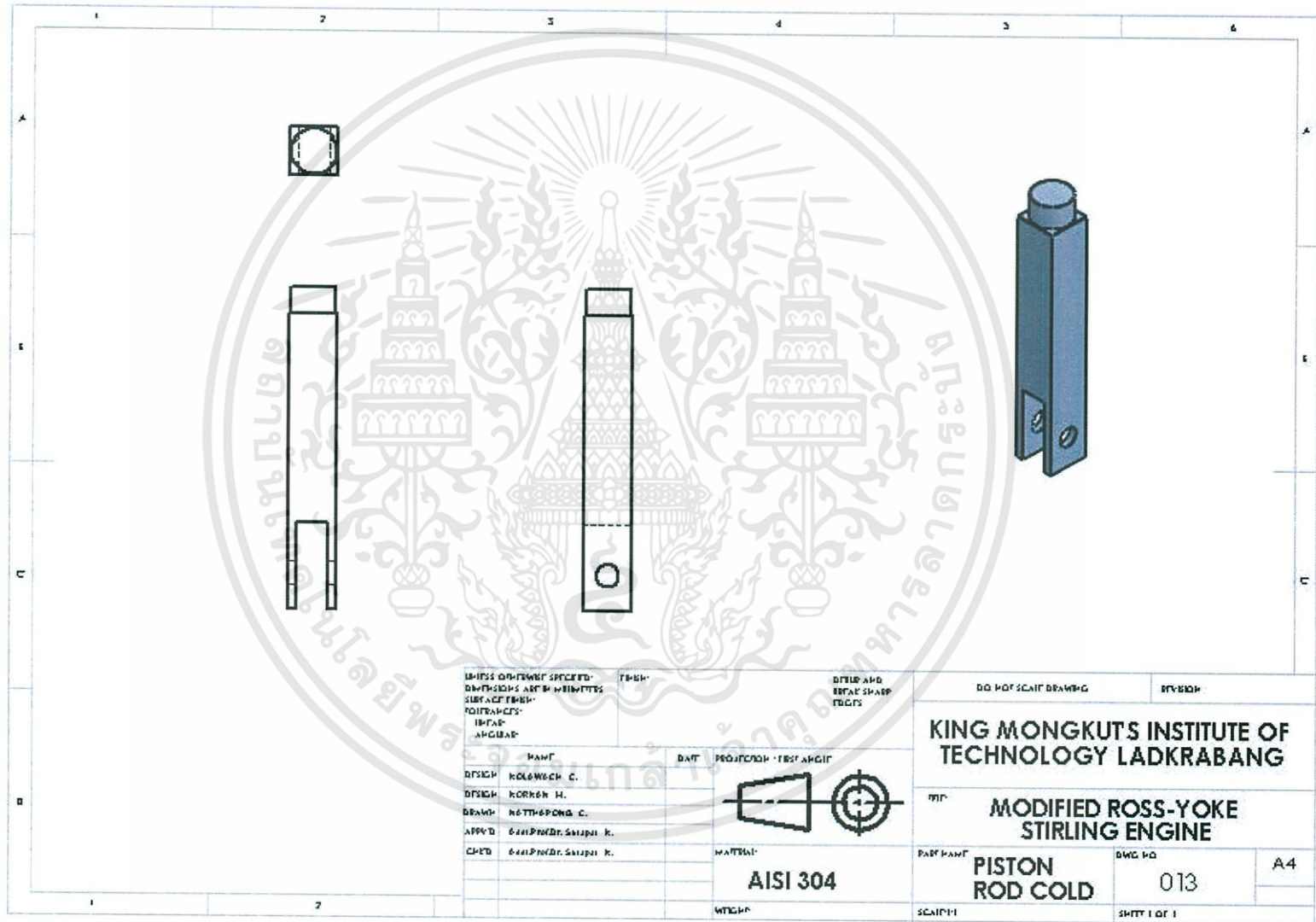
รูปที่ ก.14ล้อชาวนร



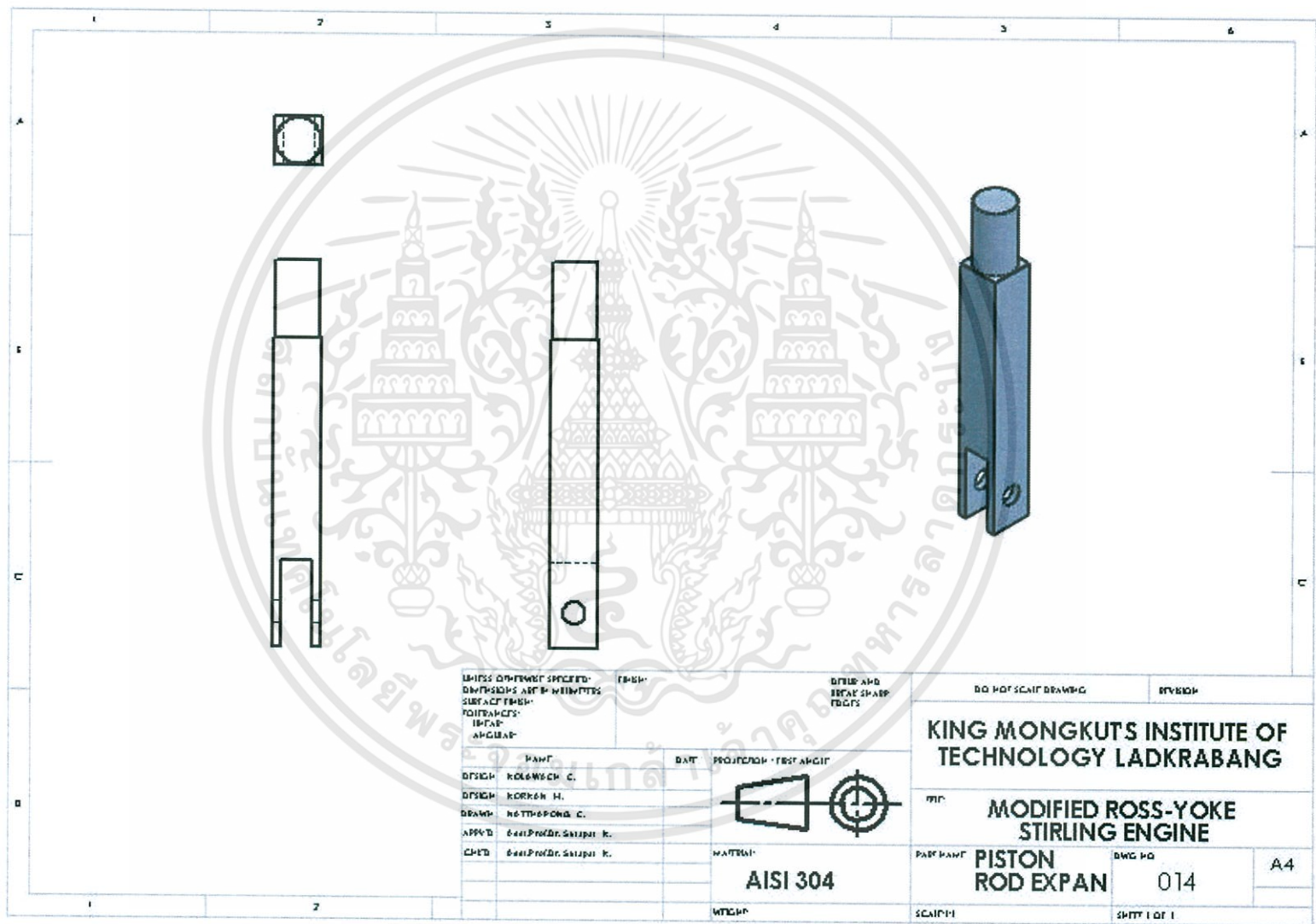
รูปที่ ก.16 เติมรับความร้อน



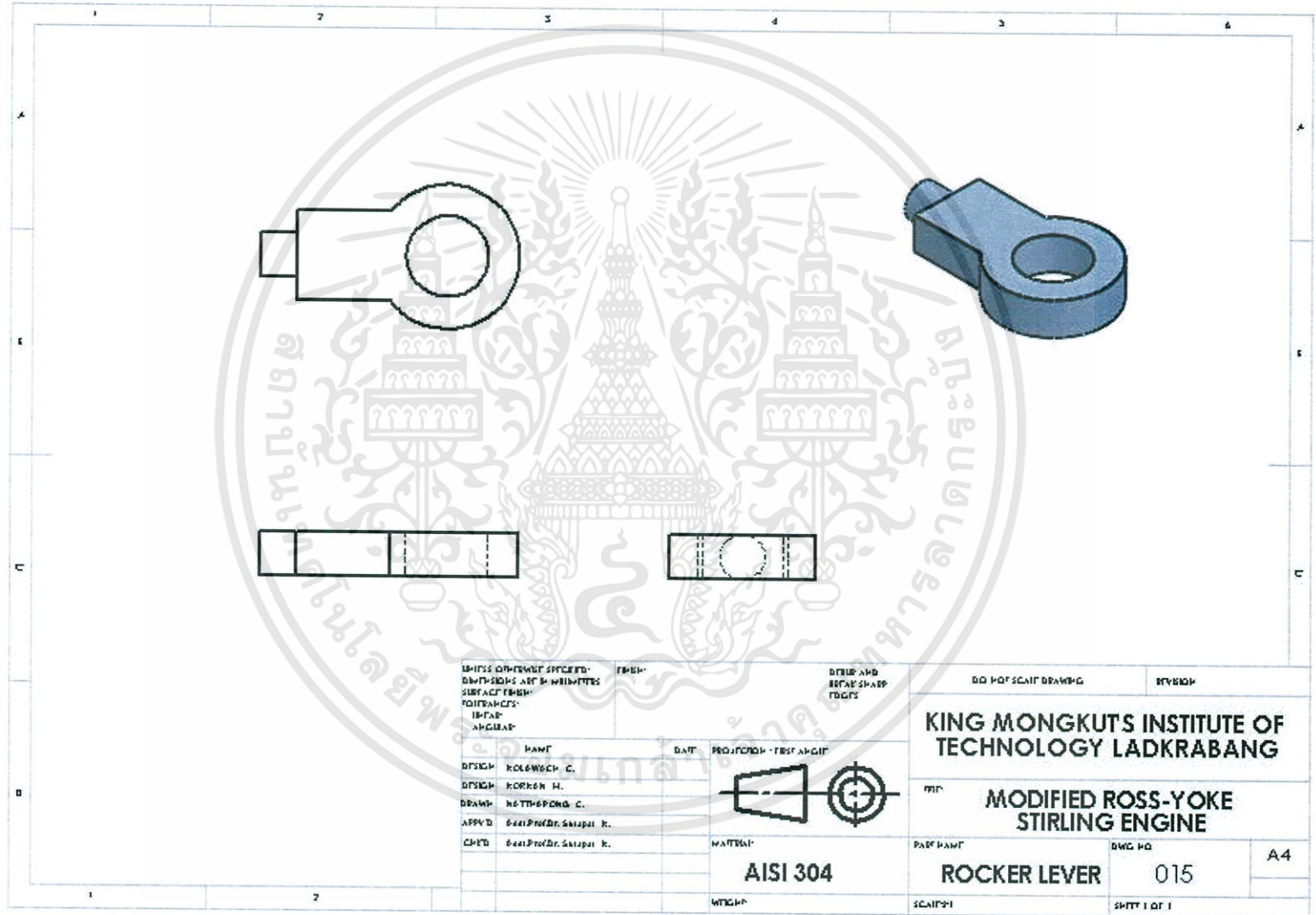
รูปที่ ก.17 ก้านสูบฝั่งอัดตัว



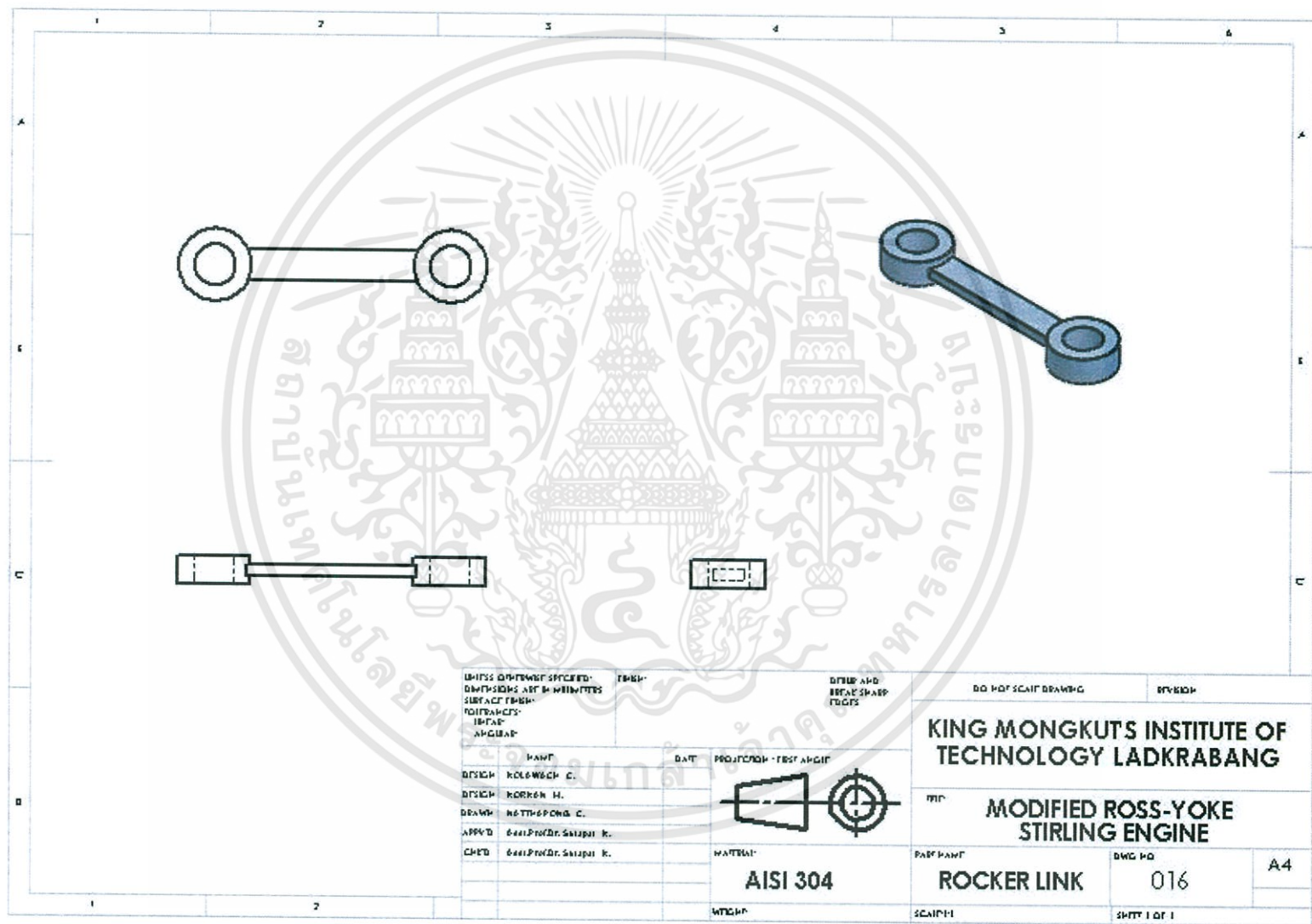
รูปที่ ก.18 ก้านสูบฝั่งขยายตัว



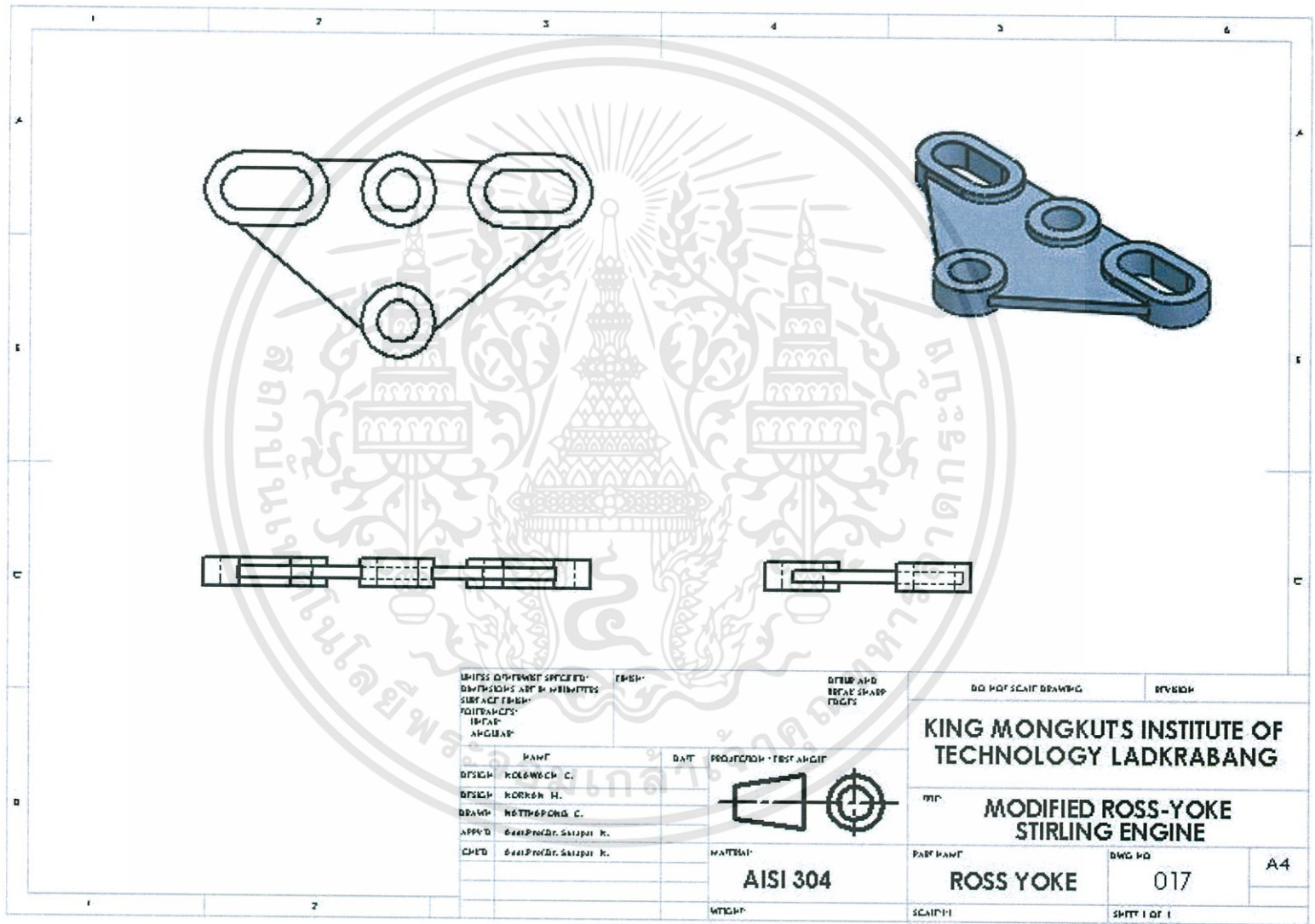
รูปที่ ก.19 ตัววัดตำแหน่งลิ้นกเกอร์



รูปที่ ก.20 ตำแหน่งล็อกเกอร์



รูปที่ ก.21 รอกสเตอร์แบบปรับปรุง



รูปที่ ก.22สุดท้าย

