

การออกแบบและพัฒนาระยะชักที่มีผลต่อแรงบิดของ
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา
DESIGN AND DEVELOPMENT OF STROKE THAT
AFFECTS THE TORQUE OF THE STIRLING ENGINE
TYPE GAMMA



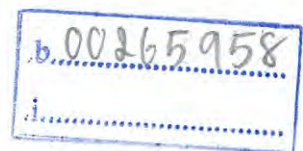
นายชาญชัย คำอาจ
นายบุญฤทธิ์ เสริมรัมย์
นายสวัสดิ์ ใหญ่สวัสดิวงศ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การออกแบบและพัฒนาระยะชักที่มีผลต่อแรงบิดของ
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา
DESIGN AND DEVELOPMENT OF STROKE THAT
AFFECTS THE TORQUE OF THE STIRLING ENGINE
TYPE GAMMA



นายชาญชัย คำอาจ
นายบุญฤทธิ์ เสมรัมย์
นายสวัสดิ์ ใหญ่สวัสดิ์วงศ์



TB00190

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2558
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF STROKE THAT
AFFECTS THE TORQUE OF THE STIRLING ENGINE
TYPE GAMMA



MR. CHANCHAI KAM-ART
MR. BOONYARIT SEMRAM
MR. VASAWAT YAISAWATWONG

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2015

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การออกแบบและพัฒนาระยะซึกที่มีผลต่อแรงบิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

Design and Development of Stroke that Affects the Torque of the Stirling Engine Type Gamma

ชื่อนักศึกษา นายชาญชัย คำอาจ รหัสนักศึกษา 55051483
นายบุญฤทธิ เสมรัมย์ รหัสนักศึกษา 55051540
นายสวัสดิ์ ใหญ่สวัสดิ์วงษ์ รหัสนักศึกษา 55051607





ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการคุมสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.เชษฐา รัตนพันธ์ กรรมการ	
อ.ภารุจ บัณฑิตาวิทย์ กรรมการ	
รศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในชั้นเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การออกแบบและพัฒนาระยะชักที่มีผลต่อแรงบิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	
ชื่อนักศึกษา	นายชาญชัย คำอาจ	รหัสนักศึกษา 55051483
	นายบุญฤทธิ์ เสมรัมย์	รหัสนักศึกษา 55051540
	นายวสวัตต์ ใหญ่สวัสดิ์วงศ์	รหัสนักศึกษา 55051607
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษเล่มนี้เป็นการศึกษาการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยการออกแบบโดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์คและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยใช้วัสดุคือ ทองเหลือง สแตนเลสและอลูมิเนียม จากการออกแบบและสร้าง ได้รัศมีระยะชักที่ล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคือ 10 มิลลิเมตร โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อเกียร์กระตุ้นกำลังเท่ากับ $2.31375 \times 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$ จากนั้นทำการทดลองโดยวัดค่าอุณหภูมิและความเร็วรอบเพื่อนำมาคำนวณหาค่าแรงของเครื่องยนต์และแรงบิด (ทอร์ค) จากการทดลองพบว่าเมื่อให้ความร้อนกับเครื่องยนต์ เครื่องยนต์เริ่มทำงานที่เวลา 4 นาที อุณหภูมิ 266 องศาเซลเซียส มีความเร็วรอบสูงสุดคือ 940 รอบต่อนาที และได้ความเร็วรอบเฉลี่ยคือ 644 รอบต่อนาที นำค่าที่ได้จากการทดลองหาค่าแรงของลูกสูบเครื่องยนต์ในช่วงมุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่พวกเราได้ออกแบบและสร้างนี้มีแรงสูงสุดเท่ากับ 2.3357 N อยู่ที่มุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังที่ 0 องศาและ 360 องศา และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 46.15% จะเห็นได้ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาขนาดเล็กสองล้อเกียร์ที่เราได้ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถทำงานได้จริง

คำสำคัญ: เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา, มุมข้อเหวี่ยง

Title	Design and Development of Stroke that Effects the Torque of the Stirling Engine Type Gamma	
Student	Mr. Chanchai Kam-Art	Student ID 55051483
	Mr. Boonyarit Semram	Student ID 55051540
	Mr. Vasawat Yaisawatwong	Student ID 55051607
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL)	
Academic	2015	
Advisor	Assoc.Prof.Sarai Lekchaum	

Abstract

A special project is study of Stirling engine by design and construction Stirling engine by using material is brass, stainless steel and aluminum. In this design and construction of two fly wheels that it have radial stroke equal to 10 millimeters. The moment of inertia of two fly wheels is $2.31375 \times 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$. The experimental will use measuring of the temperature and round speed for calculate the force of the engine and torque. Then, the experiment found that when used to heat the engine. The Engine starts at 4 minutes and temperature is 266°C . There is a maximum round speed 940 rpm. The average of the engine is 644 rpm. We will use the value from experiment to calculate force of the engine piston in the crank angle at 0° to 360° . The maximum force is 2.3357 N at the piston crank angle equal to 0° and 360° . The thermal efficiency is 46.15%. So, the Stirling engine type gamma design and construct with two fly wheels so that this engine can actually works.

Keywords: The Sterling Engine Type Gamma, Crank angle

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องนี้สามารถเสร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนจาก รองศาสตราจารย์สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ผู้ซึ่งให้คำแนะนำปรึกษาทางด้านวิชาการที่ติดต่อมาและยังเสนอแนะข้อสงสัยต่างๆทำให้คณะผู้จัดทำมีความรู้ความเข้าใจและแนวทางที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดทำโครงการพิเศษนี้ด้วย

ขอขอบคุณ นายคณิงชาติ แสนยศ นักศึกษาบัณฑิตศึกษาศาखाวิชา พิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้แนวความรู้และแนวความคิดในการออกแบบทำให้การสร้างและศึกษาพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและยังช่วยสอนการใช้เทคนิคต่างๆในการใช้อุปกรณ์เครื่องกลึงได้อย่างถูกต้อง และให้กำลังใจที่ดีในการทำโครงการพิเศษมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ อาจารย์สาโรจน์ ชูอำไพ และคณะอาจารย์ประจำตึกซ่อมสร้าง คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุนสถานที่ที่ใช้ในการปฏิบัติงานและเครื่องมือที่สำคัญในการทำโครงการพิเศษและเป็นที่ปรึกษาพร้อมทั้งให้กำลังใจที่ดีโดยตลอดมา ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สาขาพิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่ให้คำปรึกษาช่วยเหลือและทั้งให้กำลังใจในการโครงการพิเศษมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบันตลอดจน กราบขอบคุณพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้คำปรึกษา เป็นทุนทรัพย์และคอยเป็นแรงผลักดันให้คณะผู้จัดทำมีกำลังใจในการทำโครงการพิเศษซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดในการศึกษาและการทำโครงการพิเศษนี้

ชาญชัย คำอาจ
บุญฤทธิ์ เสมรัมย์
วสวัตต์ ใหญ่สวัสดิ์วงษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	4
2.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา (Stirling engine type alpha)	4
2.1.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า (Stirling engine type Beta)	5
2.1.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา (Stirling engine type Gamma)	5
2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	6
2.3 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	8
2.3.1 หลักการทางกลศาสตร์	8
2.3.2 หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์	15
2.3.3 กระบวนการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	18
2.4 การวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	19
2.5 การหาทาง กำลัง และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	21
2.6 ทฤษฎีทางวัสดุศาสตร์	23
2.6.1 วัสดุที่เลือกนำมาใช้งาน	23
2.6.2 สมบัติทางความร้อนของวัสดุ	26
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	
3.1 ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาจากต้นแบบเดิม	33
3.2 การออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาด้วยโปรแกรม solidwork	37
3.2.1 การสร้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยโปรแกรม solidwork	37
3.2.2 การขึ้นรูปชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยโปรแกรม solidwork	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การสร้างและประกอบชิ้นส่วนเข้ากับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	39
3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	39
3.4 การทดสอบและวิเคราะห์ผลการคำนวณ	42
3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	42
3.4.2 ขั้นตอนในการทดลองการทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 การวัดอุณหภูมิและรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	44
4.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังกับแรงของเครื่องยนต์	56
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดสอบจากการวัดและการวิเคราะห์	
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน	3
2.2 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรูปทรงต่างๆ มีดังตาราง	13
2.3 แสดงคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ	31
4.1 แสดงการวัดอุณหภูมิและรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ครั้งที่ 1	44
4.2 แสดงการวัดอุณหภูมิและรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ครั้งที่ 2	48
4.3 แสดงการวัดอุณหภูมิและรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ครั้งที่ 3	52
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังกับแรงของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา	5
2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า	5
2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา	6
2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาชนิดอุณหภูมิต่ำ	7
2.5 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาชนิด Ringbom	7
2.6 แสดงส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา	8
2.7 วัตถุที่ถูกกระทำด้วยแรงสองแรงซึ่งจะทำให้หยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่	9
2.8 วัตถุเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่ง a ที่มีผลมาจากการกระทำของผลรวมของแรง	9
2.9 แรงเสียดทานที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุ	10
2.11 แสดงทิศทางของทอร์คที่ตั้งฉากกับระนาบการหมุน	11
2.12 แสดงวัตถุแกว่งที่ประกอบด้วยมวลก้อนเล็กๆ	12
2.13 แสดงการเกิดงาน	15
2.14 งานของเพลลา (Shaft Work)	15
2.15 แผนภาพ P - V , T - S ของวัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ (Ideal stirling cycle)	17
2.16 แสดงกระบวนการ Isometric heating process	18
2.17 แสดงกระบวนการ Isometric heating process	18
2.18 แสดงกระบวนการ Isothermal expansion process	19
2.19 แสดงกระบวนการ Isometric cooling process	19
2.19 กระบวนการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	20
2.21 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	21
2.22 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่	28
2.24 แสดงการขยายตัวของเหล็กกล้าและทองเหลือง	29
2.27 การไหลของความร้อนจากอุณหภูมิสูง(T_2)ไปยังอุณหภูมิต่ำ(T_1)	33
3.1 ต้นแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	33
3.2 หลอดแก้วด้านฮีทเตอร์ภายในกระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์	34
3.3 เพลลาข้อเหวี่ยงที่เชื่อมต่อกับลูกสูบกำลัง	35
3.5 ก้านสูบดีเซลเพลสเซอร์กับลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์	36
3.6 ฮีสเตอร์	36
3.7 ล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง	37
3.8 กระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์	37
3.9 ฐานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา	37
3.12 กระบอกสูบกำลัง	38
3.13 กระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.14 ฮีทเตอร์	39
3.16 ล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง	40
3.18 เครื่องกลัดโลหะ	41
3.20 เวอร์เนียนคาลิปเปอร์	42
3.21 Thermometer (UNI-T UT-323)	42
2.22 Shimaden Thermocouple	43
2.23 Photo Tachometer (Lutron DT-2236)	43
3.26 ตะเกียงแอลกอฮอล์	43
4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังกับแรงของเครื่องยนต์	57



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในอดีตสิ่งประดิษฐ์ทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญมากในช่วงปี ค.ศ. 1816 คือเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling Engine) ซึ่งผู้ประดิษฐ์คิดค้นคือ บาทหลวงโรเบิร์ต สเตอร์ลิง (Robert Stirling) เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานโดยอาศัยหลักการของอากาศร้อนขยายตัว ในขณะที่อากาศเย็นหดตัว ดังนั้นการควบคุมให้ระบบดำเนินไปภายในกระบอกสูบนั้น สามารถกระทำได้โดยการให้อากาศภายในกระบอกสูบมีอุณหภูมิร้อนและอุณหภูมิต่ำสลับกัน จะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนตัวไปมาภายในกระบอกสูบ โดยที่ก้านชักนั้นเป็นตัวบังคับของกำลังของกระบอกสูบนั้นเมื่อนำมาต่อพ่วงกับตัวอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆอย่างเหมาะสมนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบพลังงานจากพลังงานความร้อนให้อยู่ในรูปของพลังงานกล

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ความร้อนชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการสันดาปภายนอกซึ่งมีความแตกต่างจากเครื่องยนต์ที่เกิดจากการสันดาปภายในที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนคือ ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีการสันดาปภายในนั้นจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์ที่เกิดจากการสันดาปภายในได้อย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ข้อดีที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนที่สุดและถือว่าเป็นหัวใจสำคัญหลักของการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือมีการทำงานที่เบามาก จึงเหมาะกับงานประเภทที่ไม่ต้องการเสียงรบกวนมากนักซึ่งแตกต่างกับเครื่องยนต์ที่เกิดจากการสันดาปภายในที่หลักการทำงานเกิดจากการระเบิดของเชื้อเพลิงซึ่งทำให้เกิดเสียงรบกวน แม้ว่าในปัจจุบันเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายในนั้นจะมีความสำคัญต่อการทำงานและมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในทั่วไป แต่ผลกระทบที่ตามมาจากเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายในก็มีอยู่ไม่น้อย อาทิ เช่น ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศเป็นต้นจึงทำให้เกิดการมองหาพลังงานทางเลือกทางอื่นที่สามารถใช้ทดแทนพลังงานที่เกิดจากการสันดาปภายในที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นหลักในการทำงาน ซึ่งได้แก่ พลังงานจากแสงอาทิตย์ (Solar Energy) พลังงานจากแหล่งความร้อนใต้พิภพ (Geothermal Energy) และพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) เป็นต้น ซึ่งพลังงานเหล่านี้หากนำมาใช้เป็นพลังงานต้นทางที่ใช้ทำงานร่วมกับระบบกลไกการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะทำให้เกิดผลลัพธ์ที่เกิดพลังงานในส่วนของพลังงานกลจะนำไปสู่การใช้งานที่เกิดประโยชน์ต่อกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้า

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถแบ่งออกเป็นสามชนิด คือ อัลฟา (Alpha) เบต้า (Beta) และแกมมา (Gamma) ที่มีการจัดเรียงของลูกสูบแตกต่างกัน แต่มีลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน ดังนี้

1. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิด อัลฟา (Type alpha stirling engine) ประกอบด้วย สองลูกสูบในกระบอกสูบแยกและมีการจัดเรียงโดยลำดับมีลักษณะเป็นแผนแบบง่าย ๆ ซึ่งสองลูกสูบนี้แบ่งออกเป็นลูกสูบริ้อนและลูกสูบเย็น

2. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิด เบต้า (Type beta stirling engine) ประกอบด้วย ลูกสูบเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังที่อาศัยอยู่ในกระบอกสูบเดียวกันและมีการจัดเรียงที่ซับซ้อน

3. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิด แกมมา (Type gamma stirling engine) ประกอบด้วย ลูกสูบเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังในกระบอกสูบแยกและมีการจัดเรียงแบบง่าย ๆ โดยทั้งสองกระบอกสูบนี้เชื่อมต่อกันและมีหลักการทำงานเช่นเดียวกันกับชนิดเบต้า

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาขนาดเล็กชนิดนี้มีการจัดเรียงของตัวลูกสูบที่ง่ายและยังให้ประสิทธิภาพด้านการทำงานในทางทฤษฎีสูงที่สุดโดยอาศัยหลักการความต่างอุณหภูมิของกระบอกสูบร้อนและกระบอกสูบด้านเย็นเพื่อเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลของการหมุนด้วยการเชื่อมต่อระยะชักของข้อเหวี่ยงไปยังล้อเกียร์ ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจจะพัฒนาโมเดลต้นแบบของระยะชักจากลูกสูบจนถึงตัวล้อเกียร์เพื่อหาค่าแรงบิดที่สูงที่สุดของเครื่องยนต์ที่ออกแบบ ซึ่งแรงบิดที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์นี้จะนำไปประยุกต์สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพัฒนาออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาขนาดเล็ก
2. เพื่อศึกษาแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบ
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาความสัมพันธ์ของแรงบิดโดยใช้อาศัยการเคลื่อนที่ของลูกสูบ
2. ศึกษาหลักการทำงานในแต่ละชั้นของวัฏจักรของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยมีการเคลื่อนที่ของลูกสูบเข้ามาคิดเพิ่มในหลักการทำงานของวัฏจักรของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วย
3. คำนวณและออกแบบชิ้นส่วนต่างๆของโมเดลต้นแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา
4. สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบ ชนิดแกมมา
5. ทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของทอร์กและแรงโดยใช้อาศัยการเคลื่อนที่ของลูกสูบโดยผ่านล้อเกียร์
6. วัดค่าแรงบิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในส่วนของด้านต่างๆที่ต้องการ

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

โครงการมีระยะเวลาในการจัดทำ รวมทั้งสิ้น 11 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2559 ซึ่งมีการดำเนินการดังนี้

จากแนวทางขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงานข้างต้น สามารถแสดงระยะเวลาดำเนินงานได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

ปีการศึกษา	2558					2559					
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1. เสนอโปรเจ็ค											
2. ศึกษาหาข้อมูล											
3. รวบรวมข้อมูล											
4. จัดเตรียมอุปกรณ์											
5. ออกแบบและสร้าง ชิ้นงาน											
6. ทดสอบการทำงานของ ชิ้นงาน											
7. ทดสอบการทำงานของ เครื่องยนต์											
8. รวบรวมข้อมูล จัดทำ รูปเล่ม											

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. นำความรู้ที่ได้จากการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา ไปประยุกต์ใช้กับชีวิตประจำวัน
2. นำความรู้ที่ได้จากการทำวิจัยสามารถนำไปเผยแพร่ให้แก่ผู้ที่มีความสนใจที่จะศึกษาในด้านพลังงานทดแทน และทางด้านอื่นๆที่มีส่วนเกี่ยวข้องได้
3. นำความรู้ที่ได้จากการใช้เครื่องมือในการตรวจสอบวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้วัดเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมาประยุกต์ใช้ในการทำงานได้
4. เข้าใจถึงหลักการทำงานของเครื่องยนต์ทางกลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

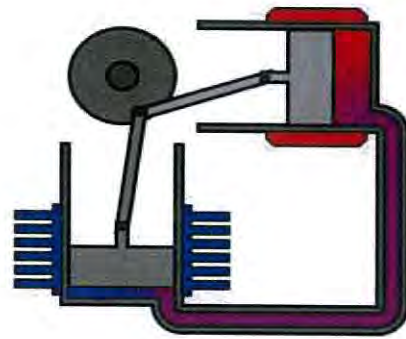
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นอุปกรณ์ทางกลศาสตร์ที่ทำงานตามวัฏจักรสเตอร์ลิงถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกโดย บาทหลวง โรเบิร์ต สเตอร์ลิง (Robert Stirling) ชาวสกอตแลนด์ เมื่อปี ค.ศ.1816 โดยเป็นเครื่องยนต์ระบบปิดที่มีการสันดาปภายนอก อาศัยหลักการบีบอัดและขยายตัวของอากาศหรือก๊าซอื่นๆ ในอดีตส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้เพื่อขับเคลื่อนเรือดำน้ำเนื่องจากมีความปลอดภัยและเงียบกว่า เครื่องจักรไอน้ำ ซึ่งมักจะเกิดระเบิดขึ้นบ่อยครั้ง ส่วนในปัจจุบันนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ถูกพัฒนาเพื่อนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีการนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งความร้อนหลายชนิดได้แก่ ความร้อนจากกากของเสียต่างๆ น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซมีเทนจากชีวมวลและความร้อนจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นที่นิยมที่สุดเพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า โดยหลักการที่เกี่ยวข้องคือ หลักการทางกลศาสตร์ หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ การวิเคราะห์ส่วนของเครื่องยนต์และวัสดุที่นำมาใช้

2.1 ลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องจักรที่ทำงานตามทฤษฎีของวัฏจักรสเตอร์ลิง โดยมีสารทำงาน (Working fluid) ที่เป็นของไหลที่อัดตัวได้ เช่น อากาศ ฮีเลียม ไฮโดรเจน ไนโตรเจนหรือไอน้ำ ที่ประกอบด้วยกระบวนการปริมาตรคงที่ในขณะที่มีไหลของสารทำงานระหว่างส่วนร้อนและส่วนเย็นและกระบวนการอุณหภูมิคงที่ขณะที่มีการรับและคายความร้อน กระบวนการอัดและขยายตัวจะเกิดที่กระบอกที่มีลูกสูบกำลัง (Power piston) ส่วนลูกสูบล้นแก๊ส (Displacer) จะดันแก๊สให้เคลื่อนที่ไปกลับระหว่างส่วนร้อน รีเจนเนอเรเตอร์ และส่วนเย็นที่ปริมาตรคงที่ โดยที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมี 3 ชนิด คือ

2.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา (Stirling engine type alpha)

ประกอบด้วย สองลูกสูบในกระบอกสูบแยกและมีการจัดเรียงโดยมีลักษณะเป็นแผนแบบง่ายๆ ซึ่งสองลูกสูบนี้แบ่งออกเป็นลูกสูบล้นและลูกสูบเย็น ลูกสูบเหล่านี้มีการเคลื่อนที่ในลักษณะที่ทำให้มีปริมาตรในระบบคงที่ เมื่อสารทำงานทั้งหมดถูกดันให้อยู่ในกระบอกสูบเดียวกัน ลูกสูบหนึ่งจะหยุดและลูกสูบหนึ่งจะเคลื่อนที่ขยายและอัดสารทำงาน งานได้จากการขยายตัวที่ลูกสูบล้น ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

2.1.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า (Stirling engine type Beta)

ประกอบด้วย ลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังที่อยู่ในกระบอกสูบเดียวกันและมีการจัดเรียงที่ค่อนข้างซับซ้อน ในการทำงานดิสเพลสเซอร์จะดันสารทำงานระหว่างส่วนร้อนและส่วนเย็นของกระบอกสูบ ส่วนลูกสูบอยู่ในส่วนเย็นของกระบอกสูบซึ่งทำหน้าที่อัดเมื่อสารทำงานอยู่ในส่วนเย็นและขยายตัวเมื่อสารทำงานเคลื่อนที่ไปยังส่วนร้อนซึ่งสารทำงานเคลื่อนที่ไปมาจากส่วนร้อนไปส่วนเย็นและจากส่วนเย็นไปส่วนร้อนนี้เกิดจากการพาของดิสเพลสเซอร์ ดังรูปที่ 2.2

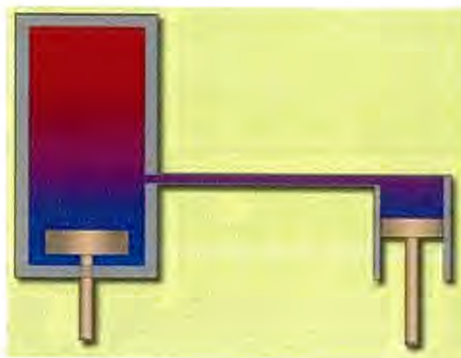


รูปที่ 2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า

2.1.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา (Stirling engine type Gamma)

ประกอบด้วย ลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังในกระบอกสูบแยกและมีการจัดเรียงแบบง่าย ๆ โดยทั้งสองกระบอกสูบนี้อัดต่อกันและมีหลักการการทำงานเช่นเดียวกับชนิดเบต้า แต่มีประสิทธิภาพเชิงกลสูงสุดในทางทฤษฎี ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา

2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาประกอบด้วยลูกสูบติสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังภายในกระบอกสูบแยกกันซึ่งจะมีการจัดเรียงแบบง่าย ๆ โดยทั้งสองกระบอกสูบนี้อาจจะเชื่อมต่อถึงกัน การแยกกันของกระบอกสูบนี้อาจทำให้มีการแยกกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกี่ยวข้องกับกระบอกสูบติสเพลสเซอร์และงานที่เกิดขึ้นจากพื้นที่การบีบอัดและขยายตัวของลูกสูบกำลัง โดยทั่วไปกระบอกสูบติสเพลสเซอร์จะมีขนาดใหญ่กว่ากระบอกสูบของลูกสูบกำลังหลายเท่า เป็นผลให้ออกอากาศการเกิดปริมาตรตายนั้นจะมีมากกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาหรือแบบเบต้า

แม้ว่ากระบอกสูบของลูกสูบทั้งสองนี้จะแยกออกจากกันแต่จะมีเพียงกระบอกสูบหนึ่งเท่านั้นที่ต้องมีลูกสูบกำลังอยู่ในป้อนกันการรั่วซึ่งจะแตกต่างจากเครื่องยนต์แบบแอลฟา นอกจากนี้การแยกกันของกระบอกสูบทั้งสองยังทำให้ลูกสูบกำลังปราศจากปัญหาในเรื่องการสะสมทางความร้อน ส่งผลให้ความแปรปรวนที่เป็นผลจากขนาดกระบอกสูบน้อยลงเนื่องจากการสร้างหรือการขยายตัว การป้อนกันการรั่วนี้จะง่ายกว่าเครื่องยนต์ชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาการป้องกันการรั่วของลูกสูบน้ำร้อนนั้นมีความท้าทาย ซึ่งปัจจุบันนั้นการป้องกันการรั่วมีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงหลายชนิดซึ่งจะต้องมีความเหมาะสมและเป็นที่ยอมรับโดยที่สามารถซ่อมบำรุงเพื่อประสิทธิภาพการทำงาน of เครื่องยนต์ การอุดรอยรั่วของเครื่องยนต์ชนิดแกมมาเมื่อเทียบกันแล้วจะง่ายกว่าทำให้เป็นที่ชื่นชอบในกลุ่มผู้สร้างโมเดลและที่ทำงานอดิเรกเนื่องจากสร้างได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ

ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกแยกออกจากกระบอกสูบกำลังแต่จะรวมอยู่กับกระบอกติสเพลสเซอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าซึ่งการออกแบบและการจัดวางตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะกลายเป็นเรื่องที่ยากกว่าจึงทำให้สามารถใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่กว่าและดีกว่าและสามารถใช้ในพื้นที่ที่ต้องการได้

โดยจะพบส่วนใหญ่ในงานวิจัยมักจะสนใจเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาเนื่องจากความสะดวกในการสร้างซึ่งจะมีอยู่สองแบบเรียกว่า เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบริงบอม (Ringbom stirling engine) และเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบอุณหภูมิต่ำ (Low temperature stirling engine) โดยที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบอุณหภูมิต่ำจะเป็นที่นิยมมากที่สุดและบ่อยครั้งมักถูกใช้เป็นต้นแบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

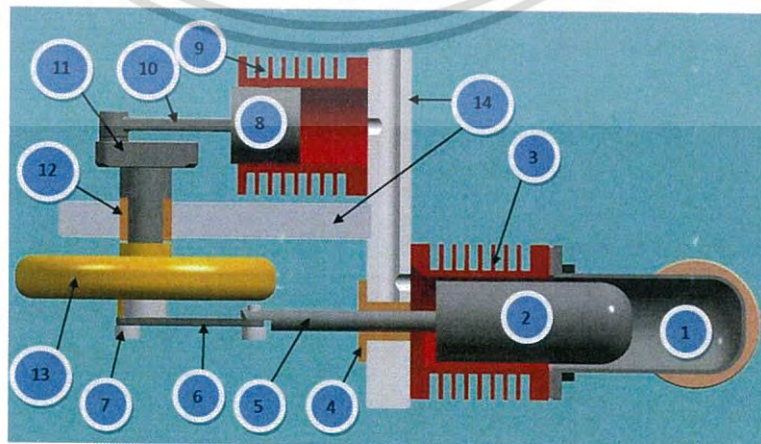


รูปที่ 2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาชนิดอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.5 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาชนิด Ringbom

ส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1: ฮีทเตอร์; 2: ลูกสูบดีสเพลสเซอร์; 3: ฮีทซิงค์; 4: บุษ; 5: แกนลูกสูบดีสเพลสเซอร์; 6: แขนเหวี่ยงสำหรับลูกสูบดีสเพลสเซอร์; 7: ข้อเหวี่ยงสำหรับลูกสูบดีสเพลสเซอร์; 8: ลูกสูบค้ำล่าง; 9: กระบอกสูบ; 10: ก้านลูกสูบค้ำล่าง; 11: เหวี่ยงสำหรับลูกสูบค้ำล่าง; 12: บุษเพลลาข้อเหวี่ยง; 13: ล้อเกียร์กระตุ่น; 14: ฐานยึดจับในแนวตั้ง

2.3 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

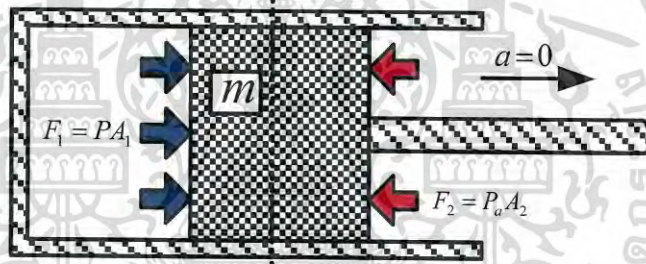
2.3.1 หลักการทางกลศาสตร์

1. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันและแรงเสียดทาน

กฎข้อที่ 1 “วัตถุที่อยู่นิ่งจะคงสภาพนิ่งนั้นหรือวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวก็จะคงสภาพการเคลื่อนที่นั้นต่อไป ยกเว้นมีแรงลัพธ์ที่ไม่เป็นศูนย์มากระทำ”

$$\sum F = 0$$

(2.1)

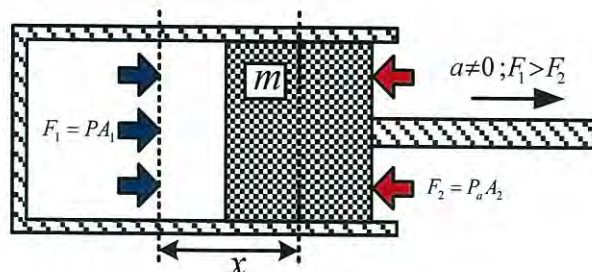


รูปที่ 2.7 วัตถุที่ถูกกระทำด้วยแรงสองแรงซึ่งจะทำให้หยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

กฎข้อที่ 2 “เมื่อมีแรงลัพธ์ที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์มากระทำต่อวัตถุ จะทำให้วัตถุเกิดอัตราเร่งในทิศเดียวกับแรงลัพธ์ที่มากระทำและขนาดของอัตราเร่งนี้จะแปรผันตรงกับขนาดของแรงลัพธ์ และแปรผกผันกับมวลของวัตถุ”

$$\sum F = ma$$

(2.2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงที่จัดการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
รูปที่ 2.8 วัตถุเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่ง a ที่มีผลมาจากการกระทำของผลรวมของแรง F
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเสียดทาน “แรงที่พยายามต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ มีทิศตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของวัตถุเสมอ” สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

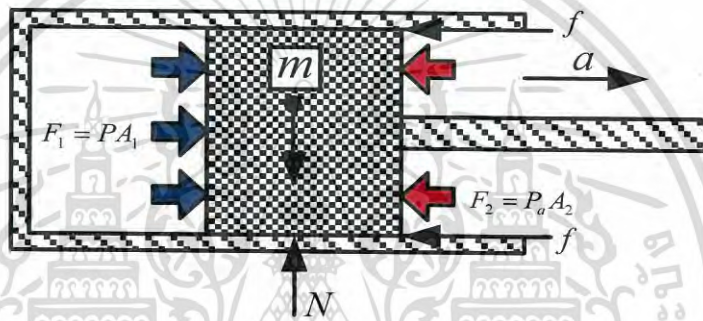
แรงเสียดทานสถิต “แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะที่วัตถุยังไม่เคลื่อนที่” หาได้จากสมการ

$$f_s = \mu N \tag{2.3}$$

จะมีค่ามากที่สุดเมื่อวัตถุกำลังจะเคลื่อนที่พอดี $f_{s,max}$

แรงเสียดทานจลน์ “แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะที่วัตถุมีการเคลื่อนที่” หาได้จากสมการ

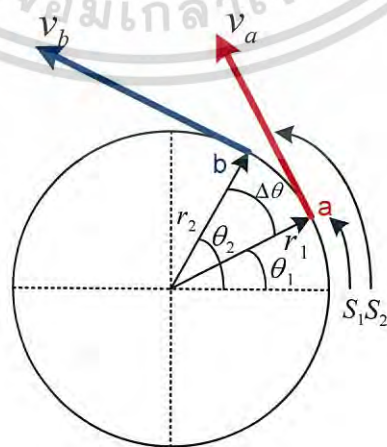
$$f_s = \mu N \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.9 แรงเสียดทานที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุ

2. การเคลื่อนที่เชิงมุมและทอร์กของแรงการเคลื่อนที่เชิงมุม

การเคลื่อนที่เชิงมุมจะวัดด้วย มุมของการเคลื่อนที่ อัตราเร็วเชิงมุมและอัตราเร่งเชิงมุม ที่มีความสัมพันธ์กับระยะ อัตราเร็วเชิงเส้นและอัตราเร่งเชิงเส้น จะสามารถหาได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.10 แสดงการเคลื่อนที่แบบหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมและระยะการกระจัด หาได้จากสมการ

$$S = r\theta \quad (2.5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับความเร็วเชิงเส้น

ความเร็วเชิงมุม ก็คืออัตราการเปลี่ยนแปลง มุม ในหนึ่งหน่วยเวลา

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.6)$$

จากรูปที่ 2.10 เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วเชิงมุม กับ ความเร็วเชิงเส้นได้ดังนี้ จากสมการที่ (2.6) จะได้ว่า

$$\frac{dS}{dt} = r \frac{d\theta}{dt} \quad (2.7)$$

ซึ่งจะเท่ากับ

$$v = \omega r$$

(2.8)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงมุมกับความเร่งเชิงเส้น

ความเร็วเร่งมุม ก็คืออัตราการเปลี่ยนแปลง ความเร็วเชิงมุม ในหนึ่งหน่วยเวลา จากสมการที่ (2.9) จะได้ว่า

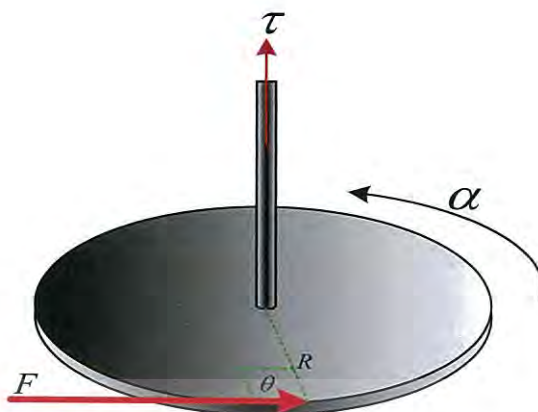
$$\frac{dv}{dt} = r \frac{d\omega}{dt} \quad (2.9)$$

ซึ่งจะเท่ากับ

$$a = \alpha r \quad (2.10)$$

ทอร์กของแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงทิศทางของทอร์คที่ตั้งฉากกับระนาบการหมุน

ทอร์คหรือขนาดของโมเมนต์ของแรง เท่าผลของแรงคูณกับระยะตั้งฉากจากจุดหมุนไปยังแนวแรงเป็นปริมาณเวกเตอร์ สมการของทอร์ค คือ

$$\tau = \sum F \cdot R \sin \theta \quad (2.11)$$

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันสำหรับการหมุนจะได้สมการของทอร์คใหม่ คือ

$$\tau = \alpha \sum_{i=1}^n m_i R_i^2$$

เมื่อ $I = \sum_{i=1}^n m_i R_i^2$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อย

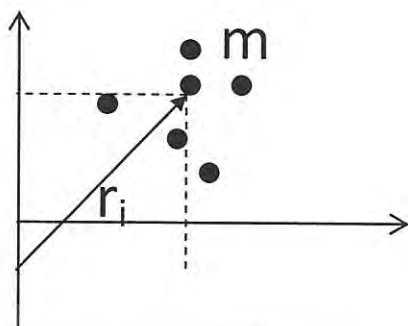
ดังนั้นจะได้ว่า

$$\tau = I\alpha = I \frac{d\omega}{dt} \quad (2.12)$$

3. โมเมนต์ความเฉื่อย

เป็นสมบัติอย่างหนึ่งเกิดขึ้นเมื่อวัตถุหมุน เป็นปริมาณที่บอกความเฉื่อยในการหมุน (Rotational Inertia) ของวัตถุในการที่จะพยายามรักษาสภาพเดิมของการหมุนเอาไว้ โดยวัตถุมีโมเมนต์ความเฉื่อยมาก ก็จะทำให้วัตถุนั้นเปลี่ยนสภาพของการหมุนได้ยากซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุมีค่าขึ้นกับแกนหมุน รูปร่างของวัตถุและลักษณะการเรียงตัวของวัตถุรอบแกนหมุน แบ่งได้เป็น 2 กรณี

1. วัตถุแข็งเกร็งประกอบด้วยมวลก้อนเล็ก ๆ โมเมนต์ความเฉื่อยคำนวณได้จากสมการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงวัตถุแข็งที่ประกอบด้วยมวลก้อนเล็กๆ

$$I = \sum_i^n m_i r_i^2 \quad (2.13)$$





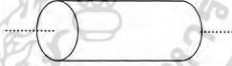

2. วัตถุแข็งเกร็งเป็นวัตถุรูปทรงเรขาคณิต หรือ วัตถุที่มีมวลกระจายต่อเนื่องกันเสมือนเป็นเนื้อเดียวกัน คำนวณหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อย ของวัตถุ

$$I = \sum_i^n m_i r_i^2 = \int r^2 dm \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุ

ตารางที่ 2.2 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรูปทรงต่างๆ มีดังตาราง

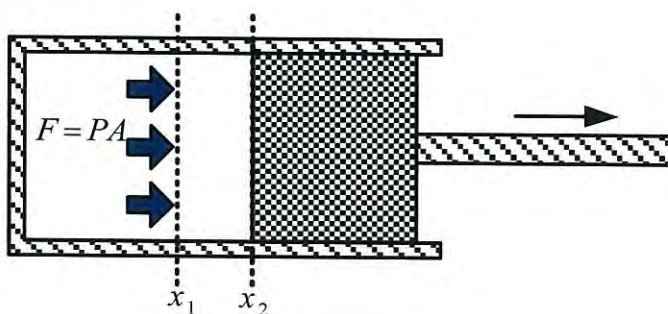
รูปร่างวัตถุ	แกนหมุน	รูป	โมเมนต์ความเฉื่อย
ทรงกลมตัน มวล m รัศมี R	รอบแกนผ่านจุดศูนย์กลาง		$I = \frac{2}{5} mR^2$
ทรงกลมกลวง มวล m รัศมี R	รอบแกนผ่านจุดศูนย์กลาง		$I = \frac{2}{3} mR^2$
แผ่นกลมบาง มวล m รัศมี R	รอบแกนผ่านศูนย์กลาง ตั้งฉากกับแผ่น		$I = \frac{1}{2} mR^2$
	รอบแกนผ่านศูนย์กลางบน ระนาบแผ่น		$I = \frac{1}{4} mR^2$
ทรงกระบอกตัน มวล m รัศมี R ยาว l	รอบแกนทรงกระบอก		$I = \frac{1}{2} mR^2$
แท่งวัตถุเล็ก มวล m ยาว l	รอบแกนผ่านศูนย์กลาง มวล ตั้งฉากกับแท่งวัตถุ		$I = mR^2$

4. งานและกำลังของเพลลา

งาน(Work) หมายถึง ผลที่เกิดจากแรง F กระทำต่อวัตถุและทำให้วัตถุนั้นเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง x งานจะมีค่าเท่ากับผลคูณของแรงกับระยะทางที่อยู่ในทิศเดียวกันนั้นคือ $\delta W = Fdx$ จะได้ว่า

$$W = \int_{x_1}^{x_2} Fdx \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดงาน

งานของเพลลา (Shaft Work)

ถ้า F มีค่าคงที่จะทำให้เกิดแรงบิด (τ , Torque) ที่มีค่าคงที่ และทำให้เพลลาหมุนด้วยความเร็วรอบ N (RPM)

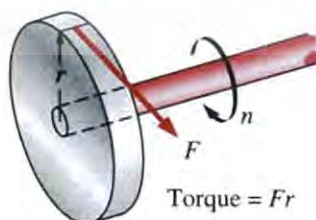
จากสมการ(2.12)

$$\tau = Fr \rightarrow F = \frac{\tau}{r} \quad x = 2\pi r \quad (2.16)$$

$$W_{sh} = Fx = \left[\frac{\tau}{r} \right] (2\pi r) = 2\pi \tau \quad (2.17)$$

และสามารถหาค่ากำลังงาน $P(W)$ ที่เพลลาได้จากสมการ

$$P_{sh} = \frac{W_{sh}}{t} = Fv = Fr\omega = \left[\frac{\tau}{r} \right] \left[\frac{2\pi Nr}{60} \right] = \frac{2\pi N\tau}{60} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.14 งานของเพลลา (Shaft Work)

2.3.2 หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์

1. กฎทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (First law of thermodynamics) “ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน ย่อมจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่นำเข้าสู่ระบบ ลบด้วยปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกจากระบบ ” ซึ่งทำให้เกิดงานทางกลต่อสิ่งแวดล้อม

กฎข้อที่หนึ่งนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$dU = dQ - dW \quad \text{.....} \quad (2.19)$$

โดยที่ dU คือปริมาณการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ

dQ คือความร้อนที่เข้าสู่ระบบ

dW คืองานที่เกิดจากระบบ

กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ (Second law of thermodynamics) “ การเพิ่มขึ้นของเอนโทรปีหรือพลังงานเสียในระบบบิอิสระ ” สามารถอธิบายได้หลายแบบดังนี้

- “ ไม่มีเครื่องจักรความร้อนใด ๆ ที่จะให้ประสิทธิภาพ 100 % ” หมายความว่าไม่มีระบบใดที่สามารถเปลี่ยนสภาวะแบบวัฏจักร โดยดึงความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิหนึ่งแล้วเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดไปเป็นงานกล คำอธิบายนี้เรียกว่า “Engine statement”
- ความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำ “ไม่สามารถถ่ายเทไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าได้โดยธรรมชาติ” หมายความว่าไม่มีระบบการใดที่สามารถส่งผ่านความร้อนจากที่ที่เย็นกว่าไปยังที่ที่ร้อนกว่าด้วยตนเองได้ จะเรียกคำอธิบายนี้ว่า “Refrigerator statement”
- “ กระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ จะเกิดขึ้นในทิศทางที่ทำให้เอนโทรปีรวมของระบบมีค่าคงที่ หรือไม่ก็เพิ่มขึ้นเท่านั้น ”

$$\Delta S \geq 0 \quad \text{.....} \quad (2.20)$$

2. วัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling Cycle) ในทางอุณหพลศาสตร์

เครื่องจักรสเตอร์ลิงมีการทำงานเป็นลักษณะวนไปมาภายใต้อุณหภูมิต่ำและสูง เรียกว่า วัฏจักรสเตอร์ลิง ซึ่งมีความแตกต่างจากเครื่องจักรสันดาปภายใน ดังต่อไปนี้

- ก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในกระบอกสูบของเครื่องจักรสเตอร์ลิง จะอยู่ในระบบปิดอยู่ภายในกระบอกสูบ ไม่สามารถรั่วไหลออกมาได้ จึงไม่ต้องมีวาล์วไอเสีย เหมือนกับเครื่องจักรก๊าซโซลีน หรือ ดีเซล และไม่มีการจุดระเบิดของหัวเทียนหรือน้ำมันเชื้อเพลิง เครื่องจึงเดินเงียบมาก

พลังงานของเครื่องจักรสเตอร์ลิงมาจากความร้อนภายนอกกระบอกสูบ จึงไม่มีการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ

เครื่องจักรสเตอร์ลิงในอุณหพลศาสตร์ คือ ไม่มีความผิดหรือแรงเสียดทานจุดเคลื่อนที่ที่ต่างและขึ้นส่วนที่เคลื่อนที่ต้องมีมวลเบา ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้จาก

แผนภาพ $P-V$ ปริมาตรภายในเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการหาค่าภายในของรูปทรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด เราขอสงวนสิทธิ์ โดยเริ่มต้นจะสามารถหาค่าความดันของระบบเมื่อมีการกำหนดค่าของปริมาตร (V) มวล ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

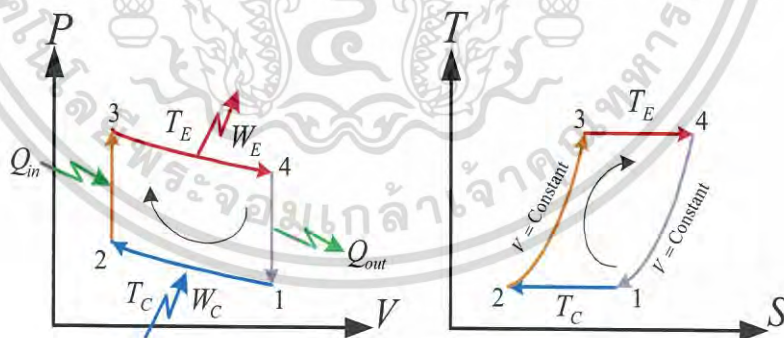
ของก๊าซ (m) และค่าอุณหภูมิ (T) ค่าความดัน P ของระบบจะสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีก๊าซในอุดมคติซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$PV = mRT \quad (2.21)$$

ค่าความดันของเครื่องยนต์จะสามารถคำนวณได้จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของสมมติฐานดังนี้

- 1) ไม่มีการสูญเสียความดันในการแลกเปลี่ยนความร้อนและไม่มี ความแตกต่างของความดันภายใน
- 2) ในกระบวนการบีบอัดและการขยายตัวจะต้องเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- 3) เงื่อนไขในการทำงานของก๊าซนั้นจะต้องเปลี่ยนเป็นเงื่อนไขของก๊าซในอุดมคติทั้งหมดต้องมีการผันกลับที่สมบูรณ์แบบ
- 4) การขยายตัวของปริมาตรตายจะต้องมีการคงค่าของอุณหภูมิในการขยายตัวของก๊าซ (T_E) และอุณหภูมิในการบีบอัดตัวของก๊าซ (T_C) ระหว่างรอบวัฏจักร
- 5) อุณหภูมิในการผันกลับของก๊าซจะต้องเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิในการขยายตัวของก๊าซ (T_E) และอุณหภูมิในการบีบอัดตัวของก๊าซ (T_C)
- 6) ปริมาตรของการขยาย (V_E) และปริมาตรของการบีบอัด (V_C) จะเปลี่ยนแปลงตามสมการเส้นโค้งแบบไฮเพอร์โบลิก

วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติจะประกอบด้วยกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ที่แตกต่างกัน 4 กระบวนการ คือ Isothermal 2 กระบวนการ และ Isometric 2 กระบวนการ ซึ่งกระบวนการในวัฏจักรนี้ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางและทุกกระบวนการจะเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ (reversible process) ดังรูปที่ 2.14

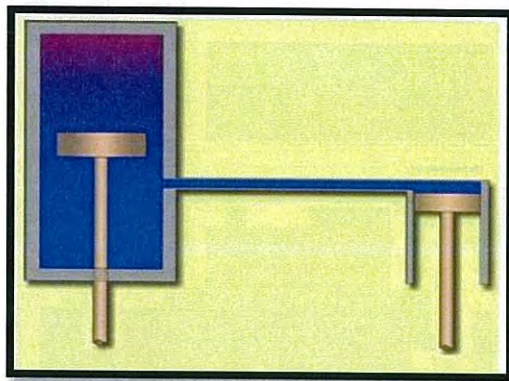


รูปที่ 2.15 แผนภาพ P - V , T - S ของวัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ (Ideal stirling cycle)

จากรูปที่ 2.15 เมื่อนำมาวิเคราะห์จะมีกระบวนการทั้งหมด 4 กระบวนการคือ

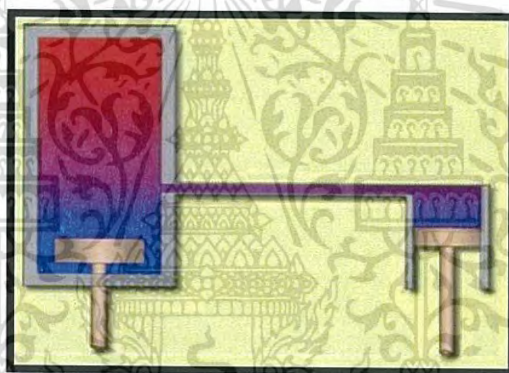
กระบวนการที่ 1-2: Isothermal compression process ลูกสูบกำลังจะบีบอัดก๊าซเย็นไปยังฮีตเตอร์เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



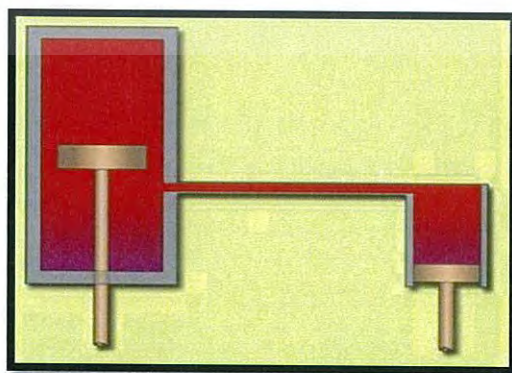
รูปที่ 2.16 แสดงกระบวนการ Isometric heating process

กระบวนการที่ 2-3: Isometric heating process ลูกสูบกำลังกำลังจะขยายตัวเนื่องจากความดันภายใน เกิดโดยการถ่ายโอนก๊าซร้อนจากฮีทเตอร์จากการพาของลูกสูบดีสเพลสเซอร์



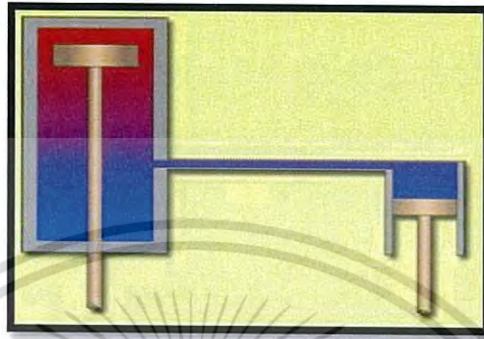
รูปที่ 2.17 แสดงกระบวนการ Isometric heating process

กระบวนการที่ 3-4: Isothermal expansion process ความดันก๊าซร้อนเพิ่มและผลักดันในลูกสูบกำลังเกิดการขยายตัวซึ่งจะมีกำลังมากสุดในวัฏจักร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

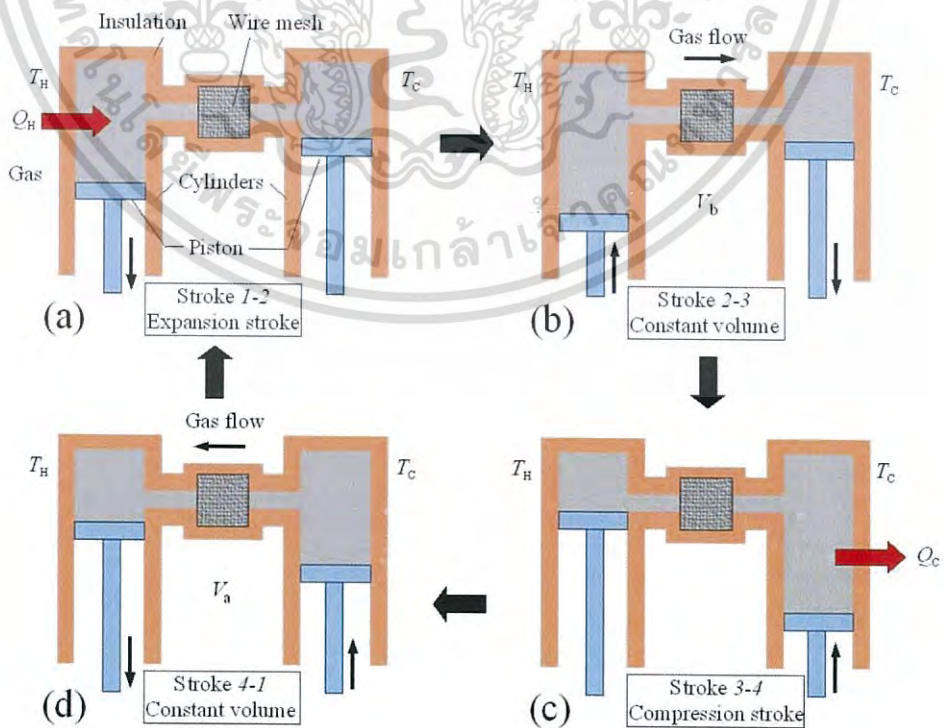
กระบวนการที่ 4-1: Isometric cooling process ลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์จะพาท่ำก๊าศเย็นจากการระบบความร้อนจากอิทซิงค์ไปยังฮีเตอร์เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับก๊าศ



รูปที่ 2.19 แสดงกระบวนการ Isometric cooling process

2.3.3 กระบวนการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

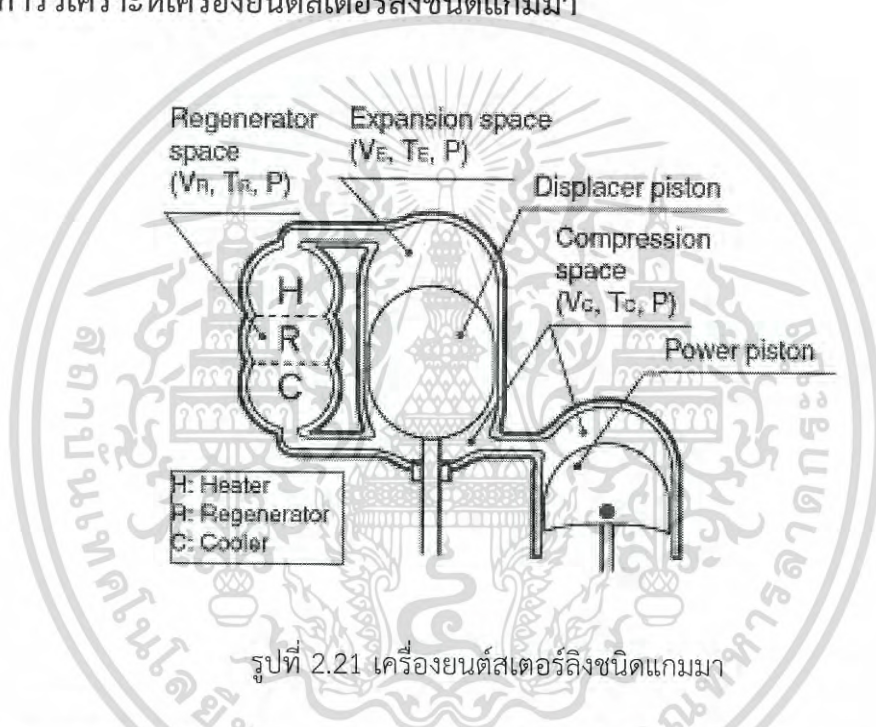
การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาสามารถพิจารณาได้ 4 ขั้นตอนซึ่งจะเป็นไปตามวัฏจักรสเตอร์ลิงดังรูปที่ 2.20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (a) Stroke 1-2 คือก๊าซในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีการขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่(อุณหภูมิร้อน) ลูกสูบดิสเพลสเซอร์เคลื่อนตัวลงแต่ลูกสูบกำลังอยู่กับที่
- (b) Stroke 2-3 ที่ปริมาตรคงที่ อุณหภูมิร้อน เย็นตัวลง ก๊าซในลูกสูบดิสเพลสเซอร์บีบตัว ก๊าซลูกสูบกำลังขยายตัว
- (c) Stroke 3-4 คือก๊าซในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีการบีบตัวที่อุณหภูมิคงที่(อุณหภูมิเย็น)) ลูกกำลังเคลื่อนตัวขึ้นแต่ลูกสูบดิสเพลสเซอร์อยู่กับที่
- (d) Stroke 4-1 ที่ปริมาตรคงที่ อุณหภูมิเย็น ร้อนมากขึ้น ก๊าซในลูกสูบดิสเพลสเซอร์ขยายตัว ก๊าซลูกสูบกำลังขยายตัว

2.4 การวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา



รูปที่ 2.21 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

จากรูป 2.29 แสดงโมเดลการคำนวณของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา สมการที่ใช้ในการคำนวณคล้ายกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาและเบต้า ปริมาตรขยาย (V_E) และปริมาตรบีบอัด (V_C) จะสามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.138) และ (2.139) เมื่อปริมาตรกวาดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ด้านขยาย (V_{SE}) ปริมาตรกวาดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ด้านบีบอัด (V_{SC}) ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง (V_p) และมุมเฟส ($\Delta\theta$) อยู่ระหว่างลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos(\theta)) + V_{DE} \quad (2.22)$$

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} (1 - \cos(\theta)) + \frac{V_p}{2} (1 - \cos(\theta - \Delta\theta)) + V_{DC} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรรวม (V) สามารถอธิบายได้ตามสมการ

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (2.24)$$

ความดันของเครื่องยนต์ (P) จะใช้ค่าความดันเฉลี่ย (P_{mean}) ค่าความดันต่ำสุด (P_{min}) และความดันสูงสุด (P_{max}) ในการคำนวณ ซึ่งสามารถหาได้ตามสมการ

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{1-C^2}}{1-C \cdot \cos(\theta-a)} = \frac{P_{min} (1+C)}{1-C \cdot \cos(\theta-a)} = \frac{P_{max} (1-C)}{1-C \cdot \cos(\theta-a)} \quad (2.25)$$

กำหนดให้ V'_{SC} เป็นผลรวมของปริมาตรที่กวาดไปของลูกสูบลูกสูบดิสเพลสเซอร์ด้ายบีบอัด (V_{SC}) และปริมาตรที่กวาดไปของลูกสูบลูกสูบกำลัง (V_p) เมื่อ

$$T_i = \frac{T_C}{T_E} \quad (2.26)$$

$$V_S = \frac{V'_{SC}}{V_{SE}} \quad (2.27)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (2.28)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V'_{SC}} \quad (2.29)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (2.30)$$

$$a = \tan^{-1} \left(\frac{V_S \sin(\Delta\theta)}{T_i + \cos(\Delta\theta) + 1} \right) \quad (2.31)$$

$$S = T_i + 2T_i X_{DE} + \frac{4T_i V_R}{1+T_i} + V_S + 2X_{DC} + 1 \quad (2.32)$$

$$B = \sqrt{T_i^2 + 2(T_i - 1)V_S \cos(\Delta\theta) + V_S^2 - 2T_i + 1} \quad (2.33)$$

$$C = \frac{B}{S} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภาพ $P-V$ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาสามารถหาได้จากสมการข้างต้น

2.5 การหางาน กำลัง และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

การหางาน (พื้นที่ของแผนภาพ $P-V$) ในพื้นที่ของการบีบอัดและการขยาย สามารถคำนวณและวิเคราะห์ผลลัพธ์ของประสิทธิภาพได้ งานที่ได้จากพื้นที่ของการขยาย $W_E (J)$ จะใช้ค่าความดันเฉลี่ย (P_{mean}) ค่าความดันต่ำสุด (P_{min}) และความดันสูงสุด (P_{max}) ในการคำนวณ จะสามารถอธิบายได้ตามสมการ

$$\begin{aligned}
 W_E &= \oint PdV_E = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi \cdot C \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \\
 &= \frac{P_{min} V_{SE} \pi \cdot C \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + C}}{\sqrt{1 - C}} \\
 &= \frac{P_{max} V_{SE} \pi \cdot C \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - C}}{\sqrt{1 + C}}
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

งานที่ได้จากพื้นที่การบีบอัด $W_C (J)$ อธิบายได้จากสมการต่อไป

$$\begin{aligned}
 W_C &= \oint PdV_C = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi \cdot C \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \\
 &= \frac{P_{min} V_{SE} \pi \cdot C \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + C}}{\sqrt{1 - C}} \\
 &= \frac{P_{max} V_{SE} \pi \cdot C \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - C}}{\sqrt{1 + C}}
 \end{aligned} \tag{2.36}$$

งานทั้งหมดที่หาได้จาก 1 รอบวัฏจักร (W_i) สามารถหาได้จากสมการ

$$W_i = W_E + W_C$$

$$= \frac{P_{mean} V_{SE} \pi \cdot C \cdot (1 - T_r) \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - C^2}}$$

$$= \frac{P_{min} V_{SE} \pi \cdot C \cdot (1 - T_r) \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + C}}{\sqrt{1 - C}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= -\frac{P_{\max} V_{SE} \pi \cdot C \cdot (1 - T_i) \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - C}}{\sqrt{1 + C}} \quad (2.37)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P_{mean} , P_{min} และ P_{max} สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{P_{min}}{P_{max}} = \sqrt{\frac{1 - C}{1 + C}} \quad (2.38)$$

$$\frac{P_{max}}{P_{min}} = \sqrt{\frac{1 + C}{1 - C}} \quad (2.39)$$

กำลังที่ได้จากการขยาย $P_E(W)$ กำลังที่ได้จากการบีบอัด $P_C(W)$ และกำลังรวมของเครื่องยนต์ $P_i(W)$ สามารถหาได้ตามสมการโดยใช้ความเร็วของเครื่องยนต์ (N) รอบต่อวินาที (RPS, Hz)

$$P_E = W_E N \quad (2.40)$$

$$P_C = W_C N \quad (2.41)$$

$$P_i = W_i N \quad (2.42)$$

งานที่ได้จากการขยาย (W_E) หาได้จากสมการ (2.150) คือการให้ความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนแก่เครื่องยนต์ งานที่ได้จากการบีบอัด (W_C) คำนวณได้จากสมการ (2.152) คือการที่ไม่มีความร้อน เกิดจากการหล่อเย็นด้วยน้ำหรืออากาศ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ (η) สามารถคำนวณได้จาก

$$\eta = \frac{W_i}{W_E} = 1 - T_i \quad (2.43)$$

ประสิทธิภาพนี้จะเท่ากับประสิทธิภาพคาร์โนต์ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเครื่องจักรสามารถระบายความร้อนได้ทั้งหมด

2.6 ทฤษฎีทางวัสดุศาสตร์

2.6.1 วัสดุที่เลือกนำมาใช้งาน

- อะลูมิเนียม (Aluminium)



อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนและเบาที่มีลักษณะไม่เป็นเงา เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันชั้นบาง ๆ ที่เกิดขึ้นเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะอะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงประมาณ 49 ล้านปาสกาล (MPa) และ 400 MPa ถ้าทำเป็นโลหะผสม อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้าและทองแดง อ่อน สามารถดัดได้ง่าย สามารถกลึงและหล่อแบบได้ง่าย และมีความสามารถต่อต้านการกร่อนและความทนเนื่องจากชั้นออกไซด์ที่ป้องกัน พื้นหน้ากระจกเงาที่เป็นอะลูมิเนียมมีการสะท้อนแสงมากกว่าโลหะอื่น ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 200-400 nm (UV) และ 3000-10000 nm (IR ไกล) ส่วนในช่วงที่มองเห็นได้ คือ 400-700 nm โลหะเงินสะท้อนแสงได้ดีกว่าเล็กน้อย และในช่วง 700-3000 (IR ใกล้) โลหะเงิน ทองคำและทองแดง สะท้อนแสงได้ดีกว่า อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ดัดได้ง่ายเป็นอันดับ 2 (รองจากทองคำ) และอ่อนเป็นอันดับที่ 6 อะลูมิเนียมสามารถนำความร้อนได้ดี จึงเหมาะสมที่จะทำหม้อหุงต้มอาหาร

- ทองเหลือง (Brass)



เป็นโลหะผสมที่มีทองแดงและสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก ปริมาณของสังกะสีนั้นแปรเปลี่ยนไป ระหว่าง 5 - 45 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้ทองเหลืองที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป ทองเหลืองแตกต่างจากสำริดตรงที่ สำริดมีส่วนประกอบของทองแดงและดีบุกเป็นหลัก แต่ทองเหลืองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางชนิดก็ถูกเรียกว่า "สำริด" ก็มีทองเหลืองนั้นมีสีเหลือง จึงมีลักษณะบางส่วนคล้ายทองคำ มีความต้านทานต่อการเกิดสนิมได้ดีพอสมควร จึงนิยมนำมาทำเป็นเครื่องประดับตกแต่งภายในบ้านเรือน

ในอุตสาหกรรมผลิตทองเหลืองต่างๆไป จะแยกมาตรฐานออกไปสองกลุ่ม คือ ประเภทรีดเป็นแท่ง หรือเป็นแผ่น (Wrought copper alloys) กับอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นประเภทหล่อ (Cast copper) การผลิตทองเหลืองนั้น อาศัยการหลอมละลายทองแดงกับแร่คาลาไมน์ ซึ่งเป็นสินแร่สังกะสีชนิดหนึ่ง ในกระบวนการนี้ สังกะสีจะถูกดูดออกมาจากคาลาไมน์ และผสมเข้ากับทองแดง ทองเหลืองแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

- Admiralty brass ประกอบด้วย สังกะสี 30% ดีบุก 1% ซึ่งยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา dezincification
- Alpha brasses (Prince's metal) ประกอบด้วยสังกะสีน้อยกว่า 35% ทองเหลืองชนิดนี้สามารถตีเป็นแผ่นได้ เหมาะกับการใช้งานอุณหภูมิต่ำ
- Alpha-beta brass (Muntz metal หรือ called duplex brass) มีสังกะสี 35-45% เหมาะกับการใช้งานอุณหภูมิสูง ประกอบด้วย α กับ β phase
- Aluminium brass (Nordic gold) ประกอบด้วยอลูมิเนียม ทนทานการกัดกร่อน ใช้ทำเหรียญยูโร
- Arsenical brass มีส่วนผสมของสารหนู และมักจะใส่ลูมิเนียมด้วย ใช้ทำหม้อของห้องเผาไหม้
- Beta brasses มีสังกะสี 45-50% ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง มีความแข็งแรงทนทาน เหมาะกับการหล่อ
- Cartridge brass มีสังกะสี 30% มีคุณสมบัติในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ
- Common brass (rivet brass) มีสังกะสี 37% ราคาถูกและใช้ในที่เย็นได้
- DZR brass มีส่วนผสมของสารหนูเล็กน้อย มีคุณสมบัติต่อต้านปฏิกิริยา Dezincification
- Gilding metal เป็นทองเหลืองที่อ่อนที่สุด มีทองแดง 95% และสังกะสี 5% มักใช้เป็นส่วนประกอบของกระสุน
- High brass มีทองแดง 65% และสังกะสี 35% มีความยืดหยุ่นสูง ใช้ทำสปริง สกรู หมุด
- Leaded brass คล้ายกับชนิด alpha-beta brass แต่ใส่ตะกั่วเพิ่ม มีความสามารถในการขึ้นรูปโลหะสูง
- Low brass เป็นโลหะผสมของทองแดงกับสังกะสี มีสังกะสี 20% มีสีทองอ่อนๆ สามารถทำให้เป็นเส้นบางๆได้ดีเยี่ยม ใช้ทำท่อส่งน้ำ/แก๊สที่ยืดหยุ่นสูง
- Naval brass คล้ายกับ admiralty brass มีสังกะสี 40% และดีบุก 1%
- Red brass สูตรคือ CuZnSn มักเรียกว่า gunmetal
- Rich low brass มีทองแดง 85% สังกะสี 15% ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องประดับ
- White brass มีสังกะสีมากกว่า 50% เพราะบาง
- Yellow brass มีสังกะสี 33%

คุณสมบัติเชิงกลของทองเหลือง

สังกะสีมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของทองเหลือง โดยเพิ่มทั้งความแข็งแรง ความเหนียว และความแข็งให้กับทองแดง ในช่วงที่สังกะสีสามารถละลายให้สารละลายของแข็งในทองแดง แต่เมื่อเลยพิกัดการเป็นสารละลายของแข็งไปแล้ว สังกะสีจะให้สารประกอบเชิงโลหะกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดง ซึ่งจะมีความแข็งและเปราะ ในช่วงนี้ความแข็งแรงกับความเหนียวจะค่อยๆลดลง แต่คงจะเพิ่มความแข็งเท่านั้น

2.6.2 สมบัติทางความร้อนของวัสดุ

สมบัติทางความร้อนเป็นการตอบสนองของวัสดุต่อปฏิบัติการทางความร้อนเช่นการดูดซับพลังงานของของแข็งในรูปของความร้อนด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและขนาดพลังงานจะถ่ายเทไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าถ้าวัสดุมีสองบริเวณที่มีอุณหภูมิต่างกัน โดยวัสดุอาจเกิดการหลอมเหลวในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ความจุความร้อน การขยายตัวจากความร้อนและการนำความร้อนเป็นสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของวัสดุของแข็งในการนำไปใช้งาน

1. ความจุความร้อน (heat capacity)

วัสดุของแข็งเมื่อได้รับความร้อนอุณหภูมิจะสูงขึ้นด้วยการดูดซับพลังงานบางส่วนความจุความร้อนเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับความร้อนจากบริเวณรอบนอก ซึ่งเป็นปริมาณพลังงานที่ต้องการในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ดังสมการ

$$C = dQ / dT \quad (2.44)$$

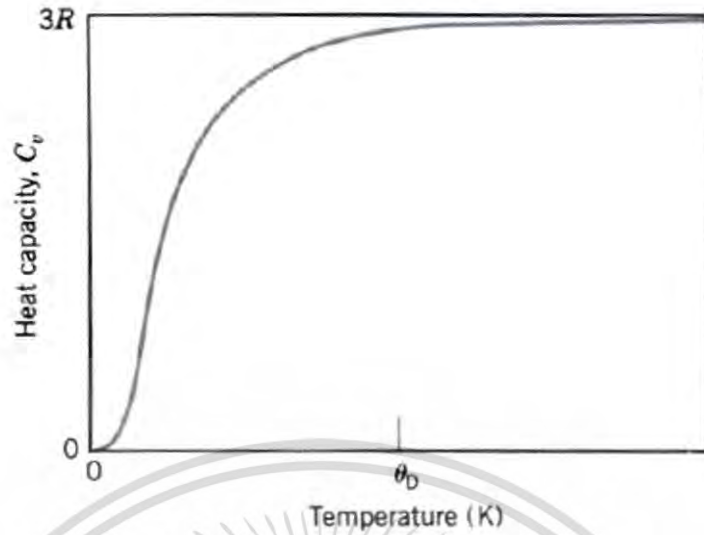
เมื่อ C คือความจุความร้อน dQ คือพลังงานที่ต้องการในการทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง dT มีหน่วยเป็นปกติค่าความจุความร้อนจะระบุเป็นต่อหน่วยโมลของวัสดุ เช่น จูลต่อโมลเคลวิน (J/mol.K) หรือ แคลอรีต่อโมลเคลวิน (cal/mol.K) ความร้อนจำเพาะ (specific heat) บางครั้งใช้แสดงความจุความร้อนต่อหน่วยน้ำหนัก และมีหน่วยต่างๆกัน เช่น จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน (J/kg.K) หรือ แคลอรีต่อกรัมเคลวิน (cal/g.K) หรือ บีทียูต่อปอนด์ฟาเรนไฮต์ (Btu/lbm.°F)

- อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความจุความร้อน (temperature dependence of the heat capacity)
เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคลื่นผลึกจะมีความสามารถที่เพิ่มขึ้นในการเพิ่มพลังงานเฉลี่ย และที่อุณหภูมิ ต่ำความสัมพันธ์ระหว่าง C_v กับอุณหภูมิสุทธิ T จะเป็นดังสมการที่

$$C_v = AT^3 \quad (2.45)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่อุณหภูมิอิสระเหนืออุณหภูมิที่เรียกว่า Debye, θ_D ซึ่งเป็นจุดที่ระดับค่า C_v เป็นอิสระจากอุณหภูมิที่ค่าประมาณ $3R$ เมื่อ R คือค่าคงที่ก๊าซ อย่างไรก็ตามพลังงานทั้งหมดของวัสดุจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยที่ปริมาณพลังงานที่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงหนึ่ง องศา มีค่าคงที่ ค่าของ θ_D จะต่ำกว่าอุณหภูมิห้องสำหรับวัสดุของแข็งหลายชนิด และค่า C_v ของ วัสดุของแข็งที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าประมาณ 25 J/mol.K (6 cal/mol.K) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งแสดงความร้อนจำเพาะจากการทดลองของวัสดุต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

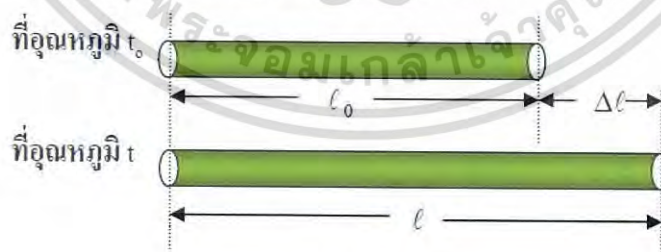


รูปที่ 2.22 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่

2. การขยายตัวของวัตถุเนื่องจากความร้อน

วัตถุเมื่อได้รับความร้อนนอกจากจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และอาจทำให้วัตถุเกิดการขยายตัวสำหรับวัตถุที่เฉลิยความร้อนได้ทั่วทั้งก้อน (Isotropic) โดยการขยายตัวของของแข็ง โดยทั่วไปเมื่อให้ความร้อนแก่ของแข็งใดๆ ของแข็งนั้นจะขยายตัวทุกทิศทางจึงมีผลทำให้รูปทรงของวัตถุนั้นเหมือนเดิม แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในด้านของความยาว พื้นที่และปริมาตร โดยการขยายตัวนั้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของของแข็งนั้น ๆ การขยายตัวของของแข็งแบ่งการพิจารณาได้เป็น 3 แบบ คือ

- การขยายตัวตามเส้น (Linear Expansion)



รูปที่ 2.23 แสดงการขยายตัวเชิงเส้น

$$\Delta l \propto l_0 \Delta t$$

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t \tag{2.46}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบรรดาใช้ภายในที่อาคารสิริภานุวงศ์ ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Coefficient of linear expansion)

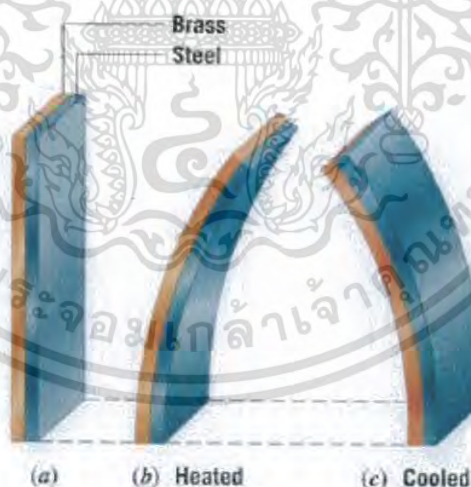
$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t} \quad (2.47)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้น คือ ความยาวของวัตถุที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วยความยาวเดิม และต่อหนึ่งองศาของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็นต่อองศา $(^{\circ}\text{C})^{-1}$ เมื่อแทนค่า $\Delta l = l - l_0$ ลงในสมการที่ (2.46) จะได้ความยาวของวัตถุ ดังนี้

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta l) \quad (2.48)$$

- การขยายตัวตามพื้นที่

วัตถุต่างชนิดกันจะยึดตัวไม่เท่ากัน เช่น เหล็กกล้ากับทองเหลืองยาวเท่ากัน เผาให้ร้อนเท่ากัน ทองเหลืองจะยึดตัวได้มากกว่าเหล็กกล้า เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองมีค่ามากกว่าเหล็กกล้า ดังนั้นเมื่อเอาเหล็กกล้ากับทองเหลืองประกบกัน แล้วตรึงด้วยหมุดให้แน่นเมื่อเผาไฟให้ร้อนจะงอโค้ง โดยมีทองเหลืองโค้งอยู่วงนอก เพราะขณะที่ร้อนทองเหลืองยาวกว่าเหล็กกล้า ในทำนองเดียวกันถ้าทำให้เย็นลง ทองเหลืองจะหดตัวมากกว่าเหล็กกล้า มันจะดึงกันให้งอไปอีกทางหนึ่ง ดังรูป



รูปที่ 2.24 แสดงการขยายตัวของเหล็กกล้าและทองเหลือง

วัตถุที่มีพื้นที่ A_0 เมื่ออุณหภูมิ t_0 $^{\circ}\text{C}$ ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิเป็น t $^{\circ}\text{C}$ จะมีพื้นที่ A ดังนั้นพื้นที่เพิ่มขึ้นคือ $\Delta A = A - A_0$ จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ $A = A_0(1 + \beta \Delta t)$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านนี้ (2.49)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ β เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามพื้นที่ของวัตถุ คือ พื้นที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เดิมและต่อหนึ่งองศาของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็นต่อองศา $(^{\circ}\text{C})^{-1}$ เนื่องจากการคำนวณหาพื้นที่ได้มาจากผลคูณความยาวของด้าน 2 ด้าน ดังนั้นทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง β และ α เป็นดังนี้

$$\beta = 2\alpha \quad (2.50)$$

- การขยายตัวเชิงปริมาตร

วัตถุที่มีปริมาตร V_0 เมื่ออุณหภูมิ $t_0^{\circ}\text{C}$ ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิ $t^{\circ}\text{C}$ จะมีปริมาตร V ดังนั้นปริมาตรเพิ่มขึ้นคือ $\Delta V = V - V_0$ จะได้ว่า

$$V = V_0(1 + \gamma\Delta t) \quad (2.51)$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามปริมาตร คือ ปริมาตรที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเดิม และต่อหนึ่งองศาของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็นต่อองศา $(^{\circ}\text{C})^{-1}$ ความสัมพันธ์ระหว่าง γ , β และ α เป็นดังนี้

$$\gamma = 3\alpha$$

หรือ

$$\gamma = \frac{3}{2}\beta \quad (2.52)$$

การขยายตัวของวัตถุตามปริมาตรมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น โดยเมื่อปริมาตรของวัตถุเปลี่ยนทำให้ความหนาแน่นของวัตถุเปลี่ยนไปด้วย เนื่องจากความหนาแน่นเท่ากับจำนวนมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ปริมาตรก็ย่อมจะเปลี่ยนแปลง แต่มวลของวัตถุจะคงเดิมเสมอ ดังนั้น ถ้าให้

ρ_0 แทนความหนาแน่นของวัตถุเมื่อปริมาตรเป็น V_0 เมื่ออุณหภูมิเป็น t_0

ρ แทนความหนาแน่นของวัตถุเมื่อปริมาตรเป็น V (เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น t)

จาก $\rho = \frac{m}{V}$ โดยที่ m แทนมวลของวัตถุ และ V แทนปริมาตรวัตถุ ดังนั้น

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \text{ และ } \rho = \frac{m}{V} \quad (2.53)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{m}{V_0} \times \frac{V}{m} = \frac{V}{V_0} \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจาก แทนค่า $V = V_0 (1 + \gamma \Delta t)$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = (1 + \gamma \Delta t) = \frac{V}{V_0}$$

ดังนั้นจะได้

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \gamma \Delta t} \quad (2.55)$$

โดยสมการที่ (11) แสดงความหนาแน่นของวัตถุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

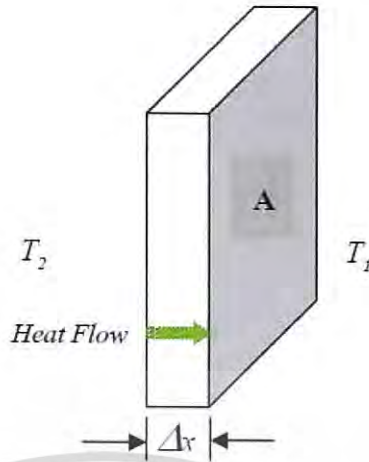


รูปที่ 2.25 แสดงรางรถไฟที่ต้องเว้นช่องว่างเพื่อป้องกันการขยายตัวเมื่อรางรถไฟมีอุณหภูมิสูงขึ้น

3. การนำความร้อน (Heat Conduction)

การส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิที่จุด 2 จุดของเนื้อวัตถุมีค่าต่างกัน เรียกการส่งผ่านความร้อนแบบนี้ว่า การนำความร้อน โดยพลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าผ่านอนุภาคที่อยู่ติดกันต่อเนื่องกันไปพิจารณาแผ่นวัสดุความหนา Δx และมีพื้นที่หน้าตัด A โดยทั้งสองด้านมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ด้านที่พิจารณามีอุณหภูมิ T_1 และ ด้านตรงกันข้ามมีอุณหภูมิ T_2 เมื่อ $T_2 > T_1$ ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงการนำความร้อน

โดยจากการทดลองพบว่าปริมาณความร้อน Q ที่ส่งผ่านจากด้านที่ร้อนกว่าไปสู่ด้านที่เย็นกว่าเมื่อเวลาผ่านไป Δt และ $(\Delta Q / \Delta t)$ แปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัด A ความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT และเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนา Δx เขียนเป็นสมการได้ว่า

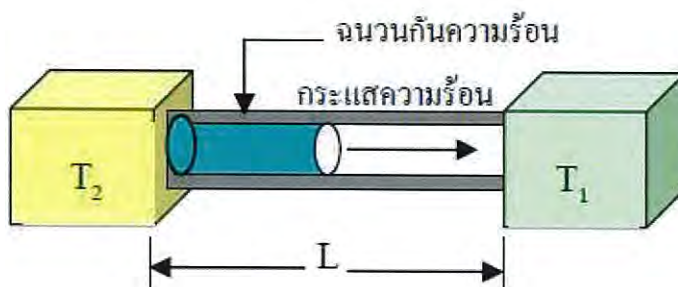
$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.56)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.57)$$

สมการที่ (2.50) เรียกว่า กฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law) ค่าคงตัว k เรียกว่า สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ($W/m \cdot K$), dT/dx คือความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) เครื่องหมายลบ แสดงให้เห็นว่าการนำความร้อนเป็นไปในลักษณะที่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นอุณหภูมิลดลง เรียก dQ/dt ว่า กระแสความร้อน (heat current, H) คืออัตราการไหลของความร้อนผ่านพื้นที่หน้าตัด A หรือพลังงานความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A ในหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) ดังนั้น

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 การไหลของความร้อนจากอุณหภูมิสูง(T_2)ไปยังอุณหภูมิต่ำ(T_1)

ถ้าพิจารณารูปทรงกระบอกยาว L พื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ A ซึ่งด้านข้างถูกหุ้มด้วยฉนวนป้องกันการรั่วไหลของความร้อน ดังรูป ในสถานะคงตัวพบว่า dT/dx มีค่าคงตัวตลอดแท่งวัตถุนั้นคือ

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.59)$$

แทนในสมการที่ (2.51) จะได้

$$H = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.60)$$

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ

วัสดุ	ความจุความร้อน C_p (J/kg.K)	ส.ป.ส การขยายตัว เชิงเส้น α [$^{\circ}\text{C}$] $\times 10^{-6}$]	ค่าสภาพ การนำความร้อน k (W/m.K)
อลูมิเนียม(Aluminum)	900	23.6	247
ทองแดง(Copper)	386	16	398
เหล็ก(steel)	486	12	51.9
ทองเหลือง(Brass)	375	20	120
ทังสเตน(Tungsten)	138	4.5	178
แก้ว(Glass)	840	9.0	1.7
แก้วไพเรกซ์ (Pyrex)	850	3.3	1.4
สแตนเลส(Stainless)	502	16	15.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยในการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาจากต้นแบบเดิม จะมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาจากต้นแบบเดิมเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา

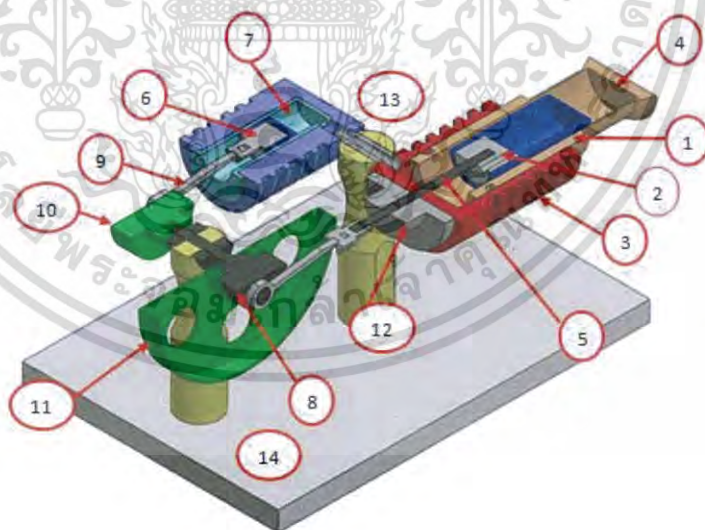
ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาด้วยโปรแกรม Solid work

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างและประกอบชิ้นส่วนเข้ากับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง และวัดผลคำนวณหาค่าความเร็วรอบ แรง ทอร์ก ปริมาตร และ อุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผล
ซึ่งจากขั้นตอนดังกล่าวจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาจากต้นแบบเดิม และหาแนวทางในการแก้ไขเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา



รูปที่ 3.1 ต้นแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

จากเครื่องยนต์ต้นแบบดังรูปที่ 3.1 การศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา สามารถแบ่งส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์ได้แก่

(1) ครอบอกลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์ คือ ครอบอกสูบที่มีลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์อยู่ภายในซึ่งจะเชื่อมต่อกับฮีทเตอร์

(2) ลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์ คือ ลูกสูบที่มีหน้าที่สำหรับไล่อากาศจากฝั่งร้อนไปยังฝั่งเย็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (3) ฮีทซิงค์ คือ ส่วนที่ช่วยในการระบายความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
- (4) ฮีทเตอร์ คือ ส่วนที่รับความร้อนโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน (ตะเกียงแอลกอฮอล์) เพื่อใช้ในกระบวนการบีบอัดและขยายตัวของของไหลภายในกระบอกสูบ
- (5) แกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ คือ ส่วนสำคัญในการรับแรงและส่งแรงให้ข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์
- (6) ลูกสูบกำลัง คือ ลูกสูบสำหรับขับเคลื่อนกำลังเพื่อส่งต่อไปยังล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง
- (7) กระบอกสูบกำลัง คือ กระบอกสูบที่มีลูกสูบกำลังอยู่ภายในซึ่งจะต้องเชื่อมต่อกับกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์
- (8) ข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์ คือ ส่วนที่เชื่อมต่อกับแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์และล้อเกียร์เพื่อถ่ายทอดกำลัง
- (9) ก้านลูกสูบกำลัง คือ ส่วนสำคัญในการรับแรงและส่งแรงให้ข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง
- (10) ข้อเหวี่ยงสำหรับลูกสูบกำลัง คือ ส่วนที่เชื่อมต่อกับก้านลูกสูบกำลังและล้อเกียร์เพื่อถ่ายทอดกำลัง
- (11) ล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง คือ ส่วนที่ใช้ในการสะสมพลังงานจลน์ซึ่งถือว่าเป็นเอาต์พุตของระบบ
- (12) บุษ คือ ตัวที่ใช้ซีลเพื่อป้องกันการรั่วของอากาศภายในกระบอกสูบเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความดันภายในกระบอกสูบ
- (13) ฐานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา คือ ส่วนที่ใช้ยึดกระบอกสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยภายในจะมีท่อที่ใช้เชื่อมต่อเพื่อและเปลี่ยนอากาศระหว่างกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และกระบอกสูบกำลัง
- (14) ฐานรับล้อเกียร์ คือ ส่วนที่ใช้ยึดล้อเกียร์กระตุ้นกำลังกับตัวข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์และข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง

ภาพของชิ้นส่วนต้นแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแต่ละชิ้น



รูปที่ 3.3 หลอดแก้วด้านฮีเตอร์ภายในกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เฟลาข้อเหวี่ยงที่เชื่อมต่อกับลูกสูบกำลัง



รูปที่ 3.5 ก้านสูบดิสเพลสเซอร์กับลูกสูบดิสเพลสเซอร์



รูปที่ 3.6 ฮีสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ล้อเกียร์กระตุนกำลัง



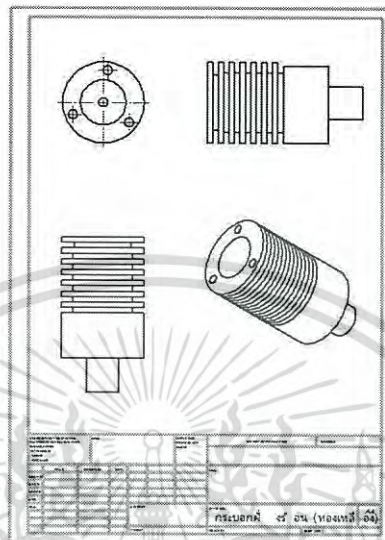
รูปที่ 3.8 กระบอกสูบดีสเพลสเซอร์



รูปที่ 3.9 ฐานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา

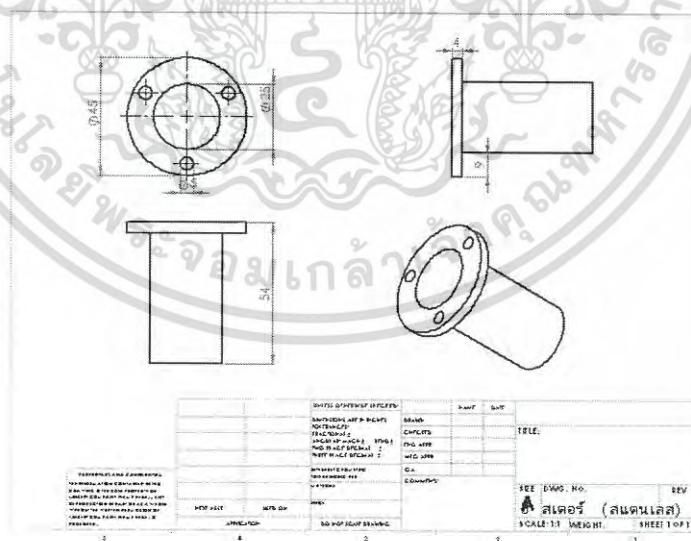
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์



รูปที่ 3.13 กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์

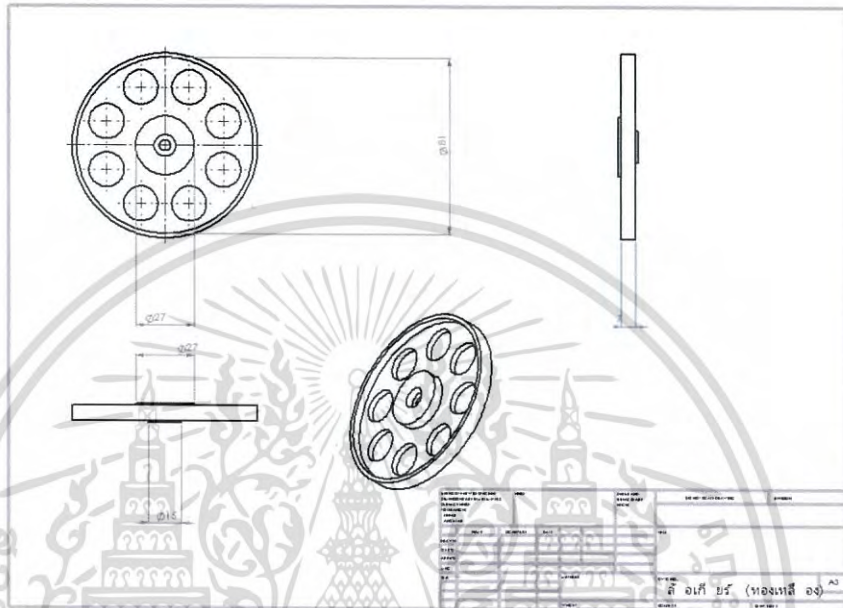
3. ฮีตเตอร์



รูปที่ 3.14 ฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ล้อเกียร์กระตุนกำลัง



รูปที่ 3.16 ล้อเกียร์กระตุนกำลัง

3.3 การสร้างและประกอบชิ้นส่วนเข้ากับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

1. เครื่องกลึงยืนศูนย์ ใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอก เช่น กระบอกสูบกำลังและกระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์ หรือชิ้นส่วนอื่นๆที่สามารถทำได้ ได้แก่
 - เครื่องกลึงยืนศูนย์แบบธรรมดา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญเตเตเนนเบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.17 เครื่องกลึงยืนศูนย์แบบธรรมดา

ส่วนประกอบของเครื่องกลึงยืนศูนย์สามารถแยกเป็น 5 ส่วนสำคัญคือ

- 1) หัวเครื่องกลึง (Head Stock)
- 2) แท่นเลื่อน (Carriage)
- 3) ยืนศูนย์ท้าย (Tail Stock)
- 4) ระบบป้อน (Feed Mechanism)
- 5) ฐานเครื่องกลึง (Bed)

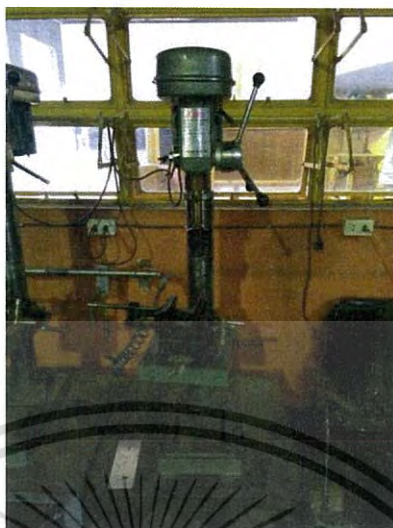
2. เครื่องกลัดโลหะ



รูปที่ 3.18 เครื่องกลัดโลหะ

3. เครื่องเจาะรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 เครื่องเจาะรู

4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและตั้งค่าต่างๆ

1. เวอร์เนียคาลิปเปอร์



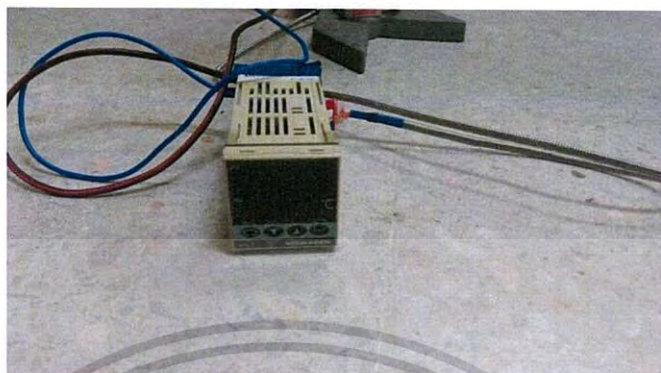
รูปที่ 3.20 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

2. Thermometer (UNI-T UT-323)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.21 Thermometer (UNI-T UT-323)
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Shimaden Thermocouple



รูปที่ 2.22 Shimaden Thermocouple

4. Photo Tachometer (Lutron DT-2236)



รูปที่ 2.23 Photo Tachometer (Lutron DT-2236)

3.4 การทดสอบและวิเคราะห์ผลการคำนวณ

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ตะเกียงแอลกอฮอล์ สำหรับให้ความร้อนแก่อีทเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 ตะเกียงแอลกอฮอล์

2. นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล
3. เครื่องวัดความเร็วรอบ Digital Tachometer (Rang 10 to 99,999 รอบต่อนาที) ทำการวัดรอบของล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง

3.4.2 ขั้นตอนในการทดลองการทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา

1. ให้ความร้อนที่จุดปลายของฮีเตอร์ซึ่งเชื่อมต่อกับกระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ดังรูปที่พร้อมทั้งทดสอบโดยการจับเวลาไปด้วย
2. ทำการกระตุ้นล้อเกียร์กระตุ้นกำลังไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมานี้สามารถหมุนอย่างต่อเนื่องได้เองและบันทึกเวลาเริ่มต้นที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา นี้สามารถหมุนอย่างต่อเนื่องได้เอง
3. ทำการวัดอุณหภูมิสูงสุดที่ผิวปลายของกระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์และที่ผิวกระบอกลูกสูบกำลัง และบันทึกผลการวัด
4. นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาต้นแบบเพื่อวิเคราะห์ผลของการพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การวัดอุณหภูมิและรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ตารางที่ 4.1 แสดงการวัดอุณหภูมิและรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ครั้งที่ 1

เวลา (S)	T ร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	T เย็น ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็วรอบ(RPM)
10	25	28	0
20	68	28	0
30	98	28	0
40	117	28	0
50	136	28	0
60	154	28	0
70	160	28	0
80	164	28	0
90	170	28	0
100	182	28	0
110	201	27.9	0
120	210	27.9	0
130	220	28	0
140	225	28	0
150	231	28	0
160	245	28	0
170	256	27.9	0
180	263	27.9	0
190	264	27.9	0
200	261	28	0
210	261	28	0
220	272	28	0
230	280	28	0
240	284	28	0
250	286	28	842.9
260	287	28.2	850
270	290	28.2	864.9
280	284	28.2	901.3
290	279	28.2	830.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใ้ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (S)	T ร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	T เย็น ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็วรอบ(RPM)
300	285	28.2	842.9
310	293	28.3	848
320	300	28.3	925
330	307	28.4	894
340	318	28.4	877
350	322	28.4	894
360	322	28.4	910
370	340	28.5	958
380	339	28.5	878
390	335	28.7	894
400	327	28.7	890
410	324	28.7	890
420	322	28.8	890
430	326	28.8	872
440	345	28.8	872
450	344	29	877
460	332	29	872
470	351	29.1	877
480	336	29.1	871
490	329	29.2	881
500	327	29.3	852
510	333	29.4	822
520	337	29.5	823
530	338	29.5	821
540	336	29.5	811
550	341	29.6	889
560	344	29.7	980
570	342	29.8	849
580	333	29.9	971
590	334	29.9	937
600	331	30	871
610	336	30.1	764
620	341	30.2	764
630	343	30.4	975
640	341	30.4	856
660	350	30.6	769

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอาไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (S)	T ร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	T เย็น ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็วรอบ(RPM)
670	357	30.7	759
680	349	30.7	777
690	341	30.9	776
700	342	31	777
710	354	31	777
720	372	31.1	774.1
730	379	31.2	777.1
740	386	31.3	780
750	383	31.4	780
760	379	31.4	762
770	373	31.5	769
780	370	31.7	764
790	366	31.8	762
800	371	31.8	758
810	381	31.8	764
820	382	31.9	772
830	370	32	772
840	365	32.1	748
850	350	32.3	760
860	349	32.4	722
870	348	32.4	793
880	341	32.5	747
890	334	32.7	756
900	329	32.8	752
910	326	32.9	736
920	322	33	751
930	321	33.2	731
940	330	33.2	730
950	351	33.3	741
960	356	33.4	739
970	356	33.5	742
980	335	33.6	730
990	325	33.6	723
1000	320	33.8	719
1010	319	33.9	728
1020	330	34	721

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (S)	T _{ร้อน} (°C)	T _{เย็น} (°C)	ความเร็วรอบ(RPM)
1030	333	34.1	810
1040	324	34.2	723
1050	318	34.3	723
1060	310	34.4	723
1070	306	34.5	681
1080	310	34.6	703
1090	355	34.7	859
1100	395	34.9	873
1110	390	35	870
1120	381	35	661
1130	391	35.1	665
1140	382	35.2	658
1150	375	35.3	650
1160	365	35.4	644
1170	360	35.4	621
1180	341	35.7	606
1190	358	35.8	682
1200	330	35.8	652

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสามารถหาได้สมการที่ 4.1

$$I = I_F + I_{rod} \quad (4.1)$$

$$= \left[\frac{1}{2} \times 127 \times (45.5)^2 \right] + \left[\frac{1}{2} \times 129 \times (42.5)^2 \right] + [7(5)^2] \quad \text{g} \cdot \text{cm}^2$$

$$= 2.31375 \times 10^{-4} \text{Kg} \cdot \text{m}^2$$

อัตราเร่งเชิงมุมหาได้จากสมการ 4.2

$$\alpha = \frac{2\pi(N_1 - N_0)}{(T_1 - T_0)} = \frac{2\pi(894 - 878)}{(10 - 0)(60S)} \quad \text{rad/s}^2 \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = 0.1675 \text{ rad/s}^2$$

ค่าทอร์คหาได้จากสมการ 4.3

$$\tau = I \times \alpha \quad (4.3)$$

$$\tau = 2.31375 \times 10^{-4} \times 0.1675$$

$$\tau = 3.8755 \times 10^{-5} \text{ rad/s}^2$$

ตารางที่ 4.2 แสดงการวัดอุณหภูมิและรอบของเครื่องยนต์สเตอคลิ่ง ครั้งที่ 2

เวลา (S)	T ร้อน (°C)	T เย็น (°C)	ความเร็วรอบ(RPM)
10	28	30.3	0
20	66	30.1	0
30	86	30.2	0
40	108	30.2	0
50	120	30.2	0
60	140	30.2	0
70	159	30.2	0
80	178	30.2	0
90	192	30.2	0
100	212	30.1	0
110	230	30.2	0
120	252	30.2	0
130	268	30.2	0
140	283	30.2	0
150	299	30.3	0
160	308	30.2	450
170	319	30.2	720
180	323	30.2	873
190	320	30.2	932
200	318	30.2	687
210	324	30.2	615
220	329	30.2	956
230	335	30.2	900
240	344	30.3	653
250	358	30.3	706
260	369	30.3	865

เวลา (S)	Tร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	Tเย็น ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็วรอบ(RPM)
270	377	30.3	735
280	379	30.3	733
290	380	30.3	880
300	386	30.3	722
310	395	30.3	719
320	402	30.5	745
330	407	30.5	759
340	410	30.5	771
350	410	30.5	770
360	411	30.5	781
370	412	30.6	775
380	413	30.6	748
390	414	30.6	760
400	418	30.8	775
410	419	30.8	787
420	424	30.9	772
430	430	30.9	767
440	430	31	811
450	431	31	824
460	435	31.1	831
470	440	31.2	836
480	442	31.3	822
490	435	31.3	813
500	436	31.4	909
510	440	31.4	762
520	443	31.5	762
530	446	31.5	758
540	445	31.6	735
550	443	31.6	744
560	442	31.8	745
570	445	31.8	748
580	444	31.8	734
590	444	31.9	752
600	442	32	760
610	435	32.1	764
620	438	32.1	744

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (S)	T ร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	T เย็น ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็วรอบ(RPM)
630	442	32.3	752
640	445	32.3	755
650	442	32.4	753
660	446	32.5	758
670	446	32.6	740
680	445	32.6	743
690	446	32.7	739
700	439	32.9	734
710	433	33	724
720	430	33.1	693
730	433	33.2	691
740	434	33.3	679
750	439	33.3	673
760	441	33.4	673
770	441	33.5	682
780	443	33.6	681
790	439	33.7	681
800	428	33.8	663
810	420	33.9	657
820	418	33.9	664
830	425	34.1	649
840	427	34.1	650
850	422	34.1	645
860	420	34.2	652
870	429	34.3	648
880	435	34.3	647
890	442	34.5	644
900	444	34.8	642
910	436	34.9	601
920	426	35.2	603
930	421	35.2	637
940	425	35.3	591
950	431	35.3	582
960	432	35.5	540
970	432	35.5	557
980	430	35.6	557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (S)	T ร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	T เย็น ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็วรอบ(RPM)
990	426	35.7	556
1000	423	35.8	553
1010	421	36	550
1020	419	36	546
1030	416	36.1	552
1040	413	36.3	548
1050	418	36.3	545
1060	421	36.4	549
1070	424	36.5	544
1080	427	36.6	543
1090	429	36.7	540
1100	422	36.8	543
1110	417	36.9	542
1120	417	37	540
1130	419	37.1	538
1140	421	37.3	520
1150	412	37.4	510
1160	409	37.5	530
1170	414	37.6	521
1180	423	37.7	527
1190	430	37.8	520
1200	435	37.8	522

$$\alpha = \frac{2\pi(N_1 - N_0)}{(T_1 - T_0)(60S)} = \frac{2\pi(752 - 744)}{(10 - 0)(60S)}$$

$$\alpha = 0.0837$$

$$\tau = I \times \alpha$$

$$\tau = 2.31375 \times 10^{-4} \times 0.0837$$

$$\tau = 1.9366 \times 10^{-5} \text{ rad/s}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงการวัดอุณหภูมิและรอบของเครื่องยนต์สเตอคลิก ครั้งที่ 3

เวลา (S)	T ร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	T เย็น ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็วรอบ(RPM)
10	40	32.4	0
20	59	32.3	0
30	71	32.4	0
40	87	32.4	0
50	111	32.4	0
60	139	32.3	0
70	160	31.9	0
80	184	32.3	0
90	211	32.3	0
100	233	32.3	0
110	251	32.3	0
120	266	32.3	0
130	287	32.3	670
140	298	32.3	752
150	312	32.3	863
160	321	32.2	952
170	330	32.2	721
180	338	32.2	692
190	349	32.2	720
200	352	32.2	740
210	359	32.2	752
220	361	32.2	790
230	365	32.2	602
240	366	32.2	703
250	362	32.2	922
260	365	32.3	690
270	369	32.3	710
280	374	32.3	721
290	377	32.2	732
300	380	32.2	745
310	383	32.3	782
320	387	32.4	831
330	398	32.4	950
340	405	32.5	742
350	401	32.3	752

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (S)	T ร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	T เย็น ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็วรอบ(RPM)
360	402	32.3	741
370	405	32.3	732
380	400	32.4	726
390	401	32.4	695
400	406	32.4	789
410	415	32.4	779
420	423	32.5	763
430	429	32.5	759
440	430	32.6	721
450	421	32.6	703
460	426	32.7	698
470	419	32.7	675
480	427	32.7	662
490	432	32.7	666
500	432	32.7	673
510	430	32.8	664
520	431	32.8	686
530	417	32.9	664
540	397	32.9	711
550	357	32.9	690
560	350	33	790
570	329	33.1	790
580	310	33.2	771
590	298	33.3	750
600	292	33.3	698
610	293	33.3	699
620	290	33.4	644
630	313	33.6	668
640	322	33.6	683
650	334	33.7	672
660	346	33.7	670
670	358	33.8	676
680	366	33.9	670
690	371	33.9	680
700	379	34.1	690
710	383	34.1	664

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (S)	T _{ร้อน} (°C)	T _{เย็น} (°C)	ความเร็วรอบ(RPM)
720	387	34.2	660
730	392	34.3	652
740	394	34.3	650
750	398	34.4	645
760	401	34.6	635
770	399	34.6	632
780	397	34.7	630
790	392	34.7	629
800	388	34.8	624
810	381	34.9	620
820	380	35	613
830	382	35.1	607
840	386	35.2	603
850	386	35.3	642
860	373	35.4	699
870	361	35.4	602
880	350	35.5	506
890	338	35.7	512
900	332	35.8	509
910	338	35.8	503
920	344	35.9	500
930	346	35.9	510
940	356	36	501
950	366	36.1	505
960	373	36.2	504
970	379	36.3	507
980	382	36.4	512
990	388	36.5	505
1000	390	36.6	503
1010	396	36.7	508
1020	400	36.8	512
1030	405	36.8	502
1040	406	36.9	503
1050	406	37.1	501
1060	402	37.2	499
1070	396	37.3	497

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรภาคิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (S)	T ร้อน (°C)	T เย็น (°C)	ความเร็วรอบ(RPM)
1080	396	37.4	493
1090	393	37.4	579
1100	389	37.5	501
1110	385	37.6	491
1120	384	37.7	482
1130	383	37.9	487
1140	381	38	482
1150	372	38.1	480
1160	363	38.2	482
1170	360	38.2	479
1180	356	38.3	476
1190	355	38.4	474
1200	358	38.6	470

$$\alpha = \frac{2\pi(N_1 - N_0)}{(T_1 - T_0)(60S)} = \frac{2\pi(683 - 668)}{(10 - 0)(60S)}$$

$$\alpha = 0.15707$$

$$\tau = I \times \alpha$$

$$\tau = 2.31375 \times 10^{-4} \times 0.15707$$

$$\tau = 3.6342 \times 10^{-5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังกับแรงของเครื่องยนต์

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังกับแรงของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

มุม (θ)	f	มุม (θ)	f
0	2.3357	180	-1.5529
10	2.2825	190	-1.547
20	2.1268	200	-1.5272
30	1.8795	210	-1.4881
40	1.5574	220	-1.4214
50	1.1818	230	-1.3177
60	0.7764	240	-1.1678
70	0.3651	250	-0.9648
80	-0.0301	260	-0.7054
90	-0.3913	270	-0.3913
100	-0.7054	280	-0.0301
110	-0.9648	290	0.3651
120	-1.1678	300	0.7764
130	-1.3177	310	1.1818
140	-1.4214	320	1.5574
150	-1.4881	330	1.8795
160	-1.5272	340	2.1268
170	-1.547	350	2.2825
180	-1.5529	360	2.3357

สามารถคำนวณหาค่าแรงได้จากสมการที่ 4.4

$$F = m_p \omega_c r \cos \theta + \frac{m_p \omega_a^2 r \cos 2\theta}{n} \quad (4.4)$$

เมื่อ $n = l/r$

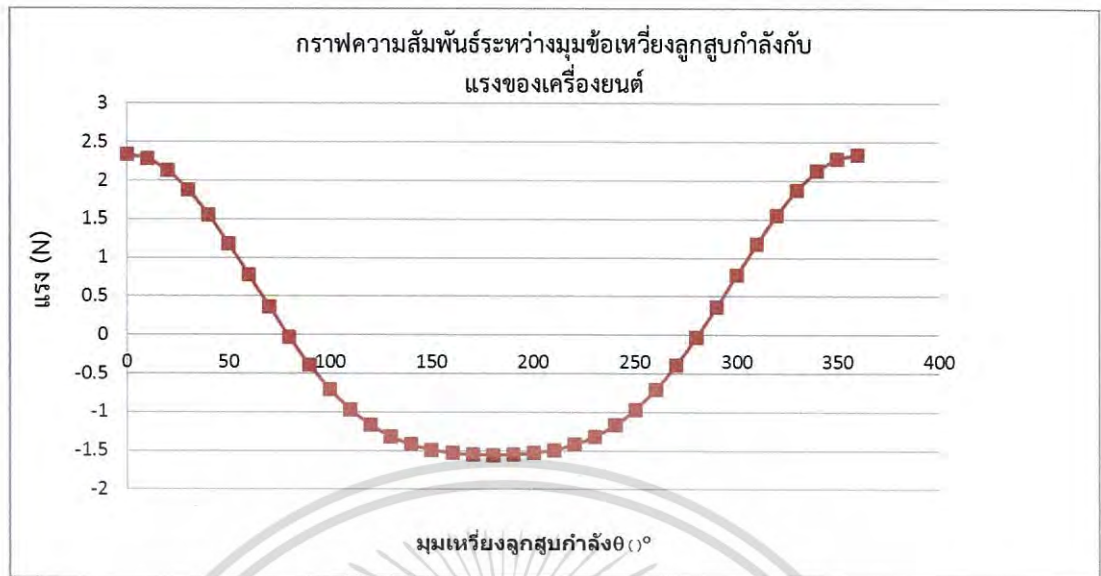
r = รัศมีระยะชัก (m)

m_p = มวลของก้านและลูกสูบ

ω_c = อัตราเร็วเชิงมุม rad/s

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังกับแรงของเครื่องยนต์

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าที่มุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังที่ 0 องศา, 360 องศา ได้แรง 2.3357 N 80 องศา และ ที่มุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังที่ 80 องศา, 280 องศา ได้แรง -0.0301 N และสามารถหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้จากสมการที่ 4.5 ดังนั้น เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่พวกเราได้ออกแบบและสร้างนี้มีแรงสูงสุดเท่ากับ 2.3357 N อยู่ที่มุมข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังที่ 0 องศา และ 360 องศา และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 46.15%

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบจากการวัดและการวิเคราะห์

การวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแก๊วม่าจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนการวิเคราะห์อุณหภูมิและรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ซึ่งมีการวัดและทดสอบด้วยกันทั้งหมด 3 ครั้ง และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์หาแรงของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ซึ่งพบว่าการทดสอบหาความเร็วรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทั้งสามครั้ง ได้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยเฉลี่ยมากกว่า 700 รอบต่อนาที ที่แรงบิด $3.8755 \times 10^{-5} \text{ rad/s}^2$ ซึ่งมีอุณหภูมิแรกเริ่มของกระบอกสูบฝั้งร้อนและกระบอกสูบฝั้งเย็นเท่ากับ 286 องศา และ 28 องศา ตามลำดับ จึงทำให้ได้แรงสูงสุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเท่ากับ 2.3357 N ที่มีมุมข้อเหวี่ยงของลูกสูบกำลัง 0 องศา และ 360 องศา และได้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเท่ากับ 46.15%

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองโดยการวัดค่าอุณหภูมิพื้นผิวของกระบอกลูกสูบ ควรใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดในหลายๆจุดแล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริงมากที่สุด

ในการเลือกใช้วัสดุในแต่ละส่วน ควรคำนึงถึงค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อน เพราะเมื่อวัสดุเกิดความร้อนขึ้นทำให้เกิดการขยายตัว ทำให้ค่าปริมาตรคลาดเคลื่อนจากที่ออกแบบไว้

รอยรั่วที่บริเวณกระบอกลูกสูบอาจทำให้ค่าประสิทธิภาพเครื่องยนต์ต่ำลง ในการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงควรตรวจรอยรั่วอย่างละเอียดที่บริเวณรอยต่อของวัสดุแต่ละชิ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] จีระศักดิ์ ตัญญาภักดิ์,อดิศร พูลสวัสดิ์ และอานนท์ พรหมแก้ว. “เครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบขนาดเล็ก ชนิดแกมมา”.(วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีลาดกระบัง,2554)
- [2] ปริพันธ์ เดชมนี่,สุรเดช ศรีสุภา และอรรถพล วงษาเทียม. “การพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบชนิดแกมมา”.(วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีลาดกระบัง,2555)
- [3] William R Martini,“Stirling engine design manual”.(University of Washington,1978)
- [4] How to work stirling[ออนไลน์],20 มกราคม 2557.
แหล่งที่มา : <http://www.somaiya.edu/projects/stirling.pdf>
- [5] Aina T., Folayan C. O. and Pam G. Y.” Influence of compression ratio on the performance characteristics of a spark ignition engine”,(Ahmadu Bello University,2012) หน้า 1915-1922
- [6] Calculate the compression ratio of an IC engine[ออนไลน์],22 มกราคม 2556
แหล่งที่มา : <http://chainganger.co.uk/Page2/PDF/CalcCR.pdf>
- [7] Caleb C. Lloyd. “A low temperature differential stirling enging for power generation”. (Thesis in master of engineering ,University of Canterbury,2009)
- [8] G.walker.”Stirling Engine”.(Oxford University Press,1980)
- [9] Solar Heat Engines[ออนไลน์],17 กุมภาพันธ์ 2557 แหล่งที่มา :
<http://www.solarheatengines.com/2012/02/09/power-piston-sizing-for-stirling-engines>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้