

การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมาด้วยหลัก
สมดุลของล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง

INCREASING THE PERFORMANCE OF GAMMA TYPE
STIRLING ENGINE WITH THE BALANCE OF FLYWHEEL



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ปีการศึกษา 2560** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCREASING THE PERFORMANCE OF GAMMA TYPE STIRLING ENGINE WITH THE BALANCE OF FLYWHEEL



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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเนื้อหาและห้องข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมาด้วยหลักสมดุลของล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง	
	Increasing the Performance of Gamma Type Stirling Engine with the Balance of Flywheel	
ชื่อนักศึกษา	นาย พีรพงศ์ แซ่มดี	รหัสนักศึกษา 57051011
	นาย ภวินท์ รักษ์ศรีทอง	รหัสนักศึกษา 57051013
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม	

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.เชษฐา รัตนพันธ์ กรรมการ	
อ.ภารุจ บัณฑิตธาตวิทย์ กรรมการ	
รศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม อาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมาด้วยหลักสมดุลของล้อยกเยอร์กระตุ้นกำลัง	
ชื่อนักศึกษา	นาย พีรพงศ์ แซ่มดี	รหัสนักศึกษา 57051011
	นาย ภวินท์ รัชศรีทอง	รหัสนักศึกษา 57051013
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษเล่มนี้ได้ทำงานออกแบบ พัฒนา และสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา โดยอาศัยความต่างของอุณหภูมิระหว่างกระบอกสูบ และใช้หลักการสวมอัด เพื่อเพิ่มความสมดุลของล้อยกเยอร์กระตุ้นกำลัง การเลือกวัสดุมาผลิตเครื่องยนต์จะพิจารณาจากการนำความร้อนของวัสดุ ประกอบไปด้วย ไม้ทองเหลือง เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม และแก้ว ในการออกแบบเครื่องยนต์จะใช้โปรแกรม Solidworks รวมทั้งทำการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ของเครื่องยนต์เพื่อหาแรงบิด และวิเคราะห์การไหลของอากาศภายในเครื่องยนต์เพื่อดูประสิทธิภาพทางความร้อน ผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมาที่ผลิตออกมาพบว่า กำลังขาออกของเครื่องยนต์อยู่ที่ 537.3 มิลลิวัตต์ที่รอบการทำงาน 450 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพทางความร้อน 40.31 เปอร์เซ็นต์ และผลการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์พบว่า ที่ความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที มีแรงบิดอยู่ที่ 1.7 นิวตันเมตร ส่วนผลการวิเคราะห์การไหลของอากาศภายในเครื่องยนต์พบว่าอุณหภูมิของไหลภายในทำงานอยู่ที่ 302 แคลวิน และสูงสุดที่ 540 แคลวิน ที่เวลาการทำงานประมาณ 1200วินาที

คำสำคัญ : เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา, ความต่างของอุณหภูมิ, ความสมดุลของล้อยกเยอร์กระตุ้นกำลัง, หลักการสวมอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Increasing the Performance of Gamma Type Stirling Engine with the Balance of Flywheel	
Students	Mr. Peerapong Chamdee	Student ID 57051011
	Mr. PAWIN RAKSRITONG	Student ID 57051013
Degree	Bachelor of Science (Applied physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2017	
Advisor	Assoc.Prof.Sarai Lekchaaum	

Abstract

This special project is design and development of twin flywheels gamma type Stirling engine by using compression ratio and theory of Fits and Tolerances. We design the engine by fixing the compression ratio of the engine at 2.5 and use air as working fluid. Material of the engine consists of wood, brass, stainless steel, Aluminium and glass. SolidWorks program was used for design component parts of the engine in 3D ,simulating flowing of working fluid inside cylinders and simulating motion of Stirling engine. After test the fabricated engine, maximum power in one cycle was obtain at 450 rpm as 537.3 mW. At maximum output power, the thermal efficiency of the engine was calculated as 40%. The result of flow simulation at initial time shows that the engine has the air temperature in displacer cylinder and power cylinder as 540 Kelvin and 302 Kelvin, and torque is 1.7 N.mm respectively. And temperature difference between both cylinders is 238 Kelvin.

Keywords : Fits and Tolerances, Gamma type Stirling engine, compression ratio, Temperature difference

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนจากรองศาสตราจารย์สาทราย เล็กขุ่ม ผู้ให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดและยังเสนอแนะข้อสงสัยต่างๆ ทำให้คณะผู้จัดทำมีความรู้ความเข้าใจและแนวทางที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำโครงการพิเศษนี้ด้วย

ขอขอบคุณ นายทองทศ แก้วกล้า นายไพฑูรย์ ไพศาล และพี่พนักงานหน่วยผลิตอุปกรณ์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต เชื้อนอุปสรณ์ จังหวัดขอนแก่น ที่ดูแลและอำนวยความสะดวกสถานที่สำหรับการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง สอนเทคนิคต่างๆในการใช้อุปกรณ์เครื่องกลโรงงานได้อย่างถูกต้อง และให้กำลังใจที่ดีในการทำโครงการพิเศษมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ อาจารย์สาโรจน์ ชูอำไพ และอาจารย์จรินทร์ โพธิ์ไชยะ ที่ช่วยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการประกอบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ขอขอบคุณ นายคณิงชาติ แสนยศ ที่ช่วยดูแลและคอยให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขชิ้นส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปประกอบเป็นระบบเครื่องยนต์เพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ นางสาวกมลทิพย์ แก้วบุญเรือง ที่คอยให้คำปรึกษาเรื่องการจัดรูปเล่มการรายงานผลของโครงการพิเศษนี้ให้มีความเหมาะสมต่อการนำเสนอ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาตั้งแต่การศึกษาค้นคว้าวิจัยจนถึงปัจจุบันตลอดจน กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ทุนทรัพย์และคอยเป็นแรงผลักดันให้คณะผู้จัดทำมีกำลังใจในการทำโครงการพิเศษซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดในการศึกษา

พีรพงศ์ แซ่มดี

ภวินท์ รัชศรีทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องยนต์ความร้อนและกฎของเทอร์โมไดนามิกส์	3
2.1.1 ประสิทธิภาพและกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์	4
2.1.2 ลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	6
2.1.3 คุณสมบัติของก๊าซที่ทำให้เกิดงานทางกลศาสตร์	6
2.1.4 วัฏจักรสเตอร์ลิง ในทางอุดมคติ	6
2.2 เครื่องยนต์สันดาปภายนอก (External Combustion Engine)	11
2.2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา	12
2.3 สภาวะและสมดุล	13
2.4 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	13
2.5 ทฤษฎีทางวัสดุศาสตร์	15
2.5.1 การเลือกใช้วัสดุ	16
2.5.2 แนวทางสำหรับการเลือกวัสดุ	16
2.5.3 ทองเหลือง (Brass)	16
2.5.4 อะลูมิเนียม (aluminium)	18
2.5.5 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)	19
2.6 การนำความร้อน	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7 งานสวมอัด	21
2.7.1 ศัพท์เฉพาะในระบบพิกัดเพื่อในงานสวม	22
2.7.2 ชนิดของงานสวม	23
2.7.3 ระบบการพิจารณาพิกัดเพื่อในงานสวม	24
2.8 การวิเคราะห์เครื่องยนต์จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์	25
2.8.1 การประเมินประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรการทำงาน ด้วยการวิเคราะห์การเคลื่อนไหว (Motion analysis)	25
2.8.2 หลักการหาค่าการส่งผ่านความร้อนที่มีความไม่คงที่ภายในของแข็ง	26
2.8.3 หลักการส่งผ่านความร้อนผ่านผิวของกระบอกสูบจากภายในออกสู่ภายนอก	26
2.8.4 หลักการเลือกอัตราการแสดงผลค่าเทอร์คเทียบกับเวลา	27
2.8.5 ทฤษฎีการเลือกความละเอียดของพื้นที่โดยการกำหนดขนาดของ Mash	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 การศึกษาส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแก๊มมาจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแก๊มมาต้นแบบ	29
3.1.1 ส่วนประกอบด้านร้อน	30
3.1.2 ส่วนประกอบด้านเย็น	33
3.1.3 ข้อเหวี่ยง	34
3.1.4 ท่ออากาศ	35
3.1.5 ล้อตุนกำลัง	35
3.1.6 เฟลา	36
3.1.7 ตลับลูกปืน	36
3.2 การเพิ่มความสมดุลของล้อตุนกำลัง	37
3.3 การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแก๊มมา	38
3.3.1 การเริ่มใช้งานโปรแกรม SolidWork พื้นฐาน	39
3.3.2 การใช้โปรแกรม SolidWork ในการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง	42
3.4 เครื่องมือในการสร้างและการวัดผลเพื่อวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง	57
3.4.1 เครื่องมือในการวัดผลเพื่อการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	61
4.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์	61
4.1.1 การคำนวณและ การวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์	62
4.2 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	75
4.3 การวิเคราะห์การไหลของของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์	76
4.4 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อประกอบระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	91
4.4.1 การรั่วไหลของระบบ	91
4.4.2 การทดสอบการตั้งล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง	92
4.4.3 ผลการยึดล้อเกียร์ด้วยหลักการพิกัดเฟืองานสวมอัด	93
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	95
5.1 สรุปผลการวิจัย	95
5.1.1 ผลการคำนวณ และการวัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์	95
5.1.2 ผลการวิเคราะห์แรงบิด และวิเคราะห์ของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์จาก แบบจำลองคอมพิวเตอร์	95
5.1.3 ผลการทดสอบเพื่อประกอบระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	96
5.2 ข้อเสนอแนะ	97
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	21
2.2	22
4.1	61
4.2	64
4.3	69
4.4	73
4.5	76
4.6	78
4.7	80
4.8	82
4.9	85
4.10	87
4.11	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นงานและมีการคายความร้อนเกิดขึ้น	5
2.2 แผนภาพ P-V ของวัฏจักรสเตอร์ลิง	7
2.3 แสดงกระบวนการ Isovolumetric heating process	7
2.4 แสดงกระบวนการ Isothermal expansion process	8
2.5 แสดงกระบวนการ Isovolumetric cooling process	8
2.6 แสดงกระบวนการ Isothermal compression process	9
2.7 ความแตกต่างของวัฏจักรการดาเนินงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจริงและเครื่องยนต์อุดมคติ	11
2.8 ผังของเครื่องยนต์สันดาปภายนอกและภายใน	12
2.9 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบต่าง ๆ	12
2.10 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา	13
2.11 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา	14
2.12 ทองเหลือง (Brass)	16
2.13 อะลูมิเนียม (aluminium)	19
2.14 สแตนเลส (Stainless Steel)	19
2.15 แสดงชนิดของระบบพิกัดเฟืองานสวม	22
2.16 แสดงความหมายของคำศัพท์เฉพาะในระบบพิกัดเฟืองานสวม	23
2.17 แสดงลักษณะงานสวมคลอน	23
2.18 แสดงลักษณะงานสวมพอดี	24
2.19 แสดงลักษณะงานสวมอัด	24
2.20 แสดงลักษณะระบบพิกัดเฟือแบบเพลาคงที่	25
2.21 แสดงลักษณะระบบพิกัดเฟือแบบรูเพลาคงที่	25
2.22 แสดงการไหลของความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงสกับทั้งความยาวและเวลา	26
2.23 แสดงการไหลของความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อน	26
2.24 แสดงการเลือกอัตราการแสดงผลสูง ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์คกับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงกันแบบไม่ต่อเนื่อง	27
2.25 แสดงการเลือกอัตราการแสดงผลสูง ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์คกับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงกันแบบต่อเนื่อง	27
2.26 แสดงการแบ่งพื้นที่ผิวของระบบออกเป็น mash ย่อยๆ จำนวนมาก	28
2.27 แสดงการแบ่งพื้นที่ผิวของระบบออกเป็น mash ย่อยจำนวนไม่มาก	28
3.1 องค์ประกอบต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	29
3.2 ส่วนประกอบด้านร้อน	30
3.3 ฮีตเตอร์ (Heater)	31
3.4 กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer cylinder)	31
3.5 ปะเก็น	32
3.6 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ และแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 3.6 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ และแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่จะนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ส่วนประกอบด้านเย็น	33
3.8 ส่วนประกอบภายในด้านเย็น	33
3.9 ลูกสูบกำลัง	34
3.10 ข้อเหวี่ยงสำหรับฝั่งดีสเพลสเซอร์	34
3.11 ข้อเหวี่ยงสำหรับฝั่งกำลัง	34
3.12 ท่ออากาศ	35
3.13 ล้อตุนกำลัง	35
3.14 เพลา	36
3.15 ตลับลูกปืน	36
3.16 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา	37
3.17 แสดงการเชื่อมต่อตลับลูกปืนเข้ากับเพลาโดยใช้หลักการสวมอัด	37
3.18 โปรแกรม SolidWork 2015	38
3.19 ตัวอย่างการ Simulation ของโปรแกรม SolidWork	39
3.20 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015	39
3.21 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (2)	39
3.22 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (3)	40
3.23 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (4)	41
3.24 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (5)	41
3.25 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (6)	42
3.26 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (7)	43
3.27 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (8)	43
3.28 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (9)	44
3.29 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (10)	44
3.30 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (11)	45
3.31 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (12)	45
3.32 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (13)	46
3.33 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (14)	46
3.34 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (15)	47
3.35 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (16)	47
3.36 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (17)	48
3.37 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (18)	48
3.38 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (19)	49
3.39 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (20)	49
3.40 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (21)	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.41 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (22)	50
3.42 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (23)	51
3.43 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (24)	51
3.44 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (25)	52
3.45 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (26)	52
3.46 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (27)	53
3.47 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (28)	53
3.48 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (29)	54
3.49 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (30)	54
3.50 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (31)	55
3.51 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (32)	55
3.52 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (33)	56
3.53 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (34)	56
3.54 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม Solidworks 2015	57
3.55 เครื่องกลึง (Manual lathe)	57
3.56 ขณะกลึงกระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์	58
3.57 เครื่องกัด (Milling machine)	58
3.58 เครื่องตัด หรือ เลื่อยตัดเหล็ก (Chain saw) (1)	59
3.59 เครื่องตัด หรือ เลื่อยตัดเหล็ก (Chain saw) (2)	59
3.60 เครื่องเจาะ (Drilling machine)	59
3.61 เทอร์โมมิเตอร์ FLUKE รุ่น 54-2B และเทอร์โมคัปเปิล FLUKE รุ่น 80pk-26	60
3.62 เครื่องวัดความเร็วรอบ Lutron รุ่น DT-2236	60
4.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อตุนกำลังคู่ชนิดแกมมา	61
4.2 แสดงปริมาตรและระยะต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	62
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรขยายและปริมาตรบีบอัดกับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์	66
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรวมกับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์	67
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในเครื่องยนต์ และปริมาตรขยาย	71
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในเครื่องยนต์ และปริมาตรรวม	71
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงกับแรง	74
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงกับแรงบิด	75
4.9 กราฟแสดงว่าสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และเวลา ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์	75
4.10 แสดงผลการวิเคราะห์การไหลจากหน้าต่างโปรแกรม Solidworks	76
4.11 แสดงอนุกรมของไหลทำงานภายในกระบอกสูบ	77

ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แสดงอุณหภูมิของแข็งเมื่อได้รับความร้อนจากการจุดฉนวน	77
4.13 แสดงจุดอ้างอิงทั้งสามภายในระบบปิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	78
4.14 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 1	80
4.15 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 2	82
4.16 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 3	84
4.17 แสดงจุดอ้างอิงทั้งสามภายในระบบปิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	84
4.18 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 1	86
4.19 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 2	88
4.20 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 1	90
4.21 แสดงการประกอบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทุกชิ้นส่วน	91
4.22 แสดงการปลดข้อเหวี่ยงที่เชื่อมต่อระหว่างล้อเกียร์กระตุ่นก้ำกึ่งและลูกสูบก้ำกึ่งออกในขณะที่ชิ้นส่วนอื่นยังคงประกอบเข้าที่อยู่	91
4.23 แสดงการทดลองหมุนล้อเกียร์กระตุ่นก้ำกึ่งที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับลูกสูบก้ำกึ่งซึ่งพบว่าลูกสูบก้ำกึ่งมีการเคลื่อนที่ซึ่งแสดงว่าระบบไม่เกิดการรั่ว	92
4.24 แสดงการทดลองหมุนล้อเกียร์กระตุ่นก้ำกึ่งที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับลูกสูบก้ำกึ่งซึ่งพบว่าลูกสูบก้ำกึ่งไม่เกิดการเคลื่อนที่ซึ่งแสดงว่าระบบเกิดการรั่ว	92
4.25 แสดงการกำหนดค่าระยะห่างระหว่างล้อเกียร์กระตุ่นก้ำกึ่งและขอบฐานไม่ให้มีระยะเป็น 10 mm และทั้งสองข้างมีระยะห่างที่เท่ากัน	93
4.26 แสดงการทำงานของระบบล้อเกียร์กระตุ่นก้ำกึ่งซึ่งยึดกับเพลาด้วยเกลียว	93
4.27 แสดงการยึดเพลากับล้อเกียร์กระตุ่นก้ำกึ่งและรูในตัวยึดลูกสูบด้วยหลักการพิงัดเฟืองานสวมอัด	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
A	พื้นที่หน้าตัด
L	ความยาวของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ของปริมาตรตาย
N	ความเร็วรอบของเครื่องยนต์
P	ความดัน
T	อุณหภูมิ
V	ปริมาตรรวม
A_d	พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
B_o	Beale number
D_{dis}	เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์
D_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบกำลัง
L_{dis}	ความยาวของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์
L_p	ความยาวของกระบอกสูบกำลัง
P_s	กำลังเอาต์พุต
\dot{Q}	อัตราการถ่ายเทความร้อน
Q_r	การถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัวทั่วแผ่นหินที่มีความหนา
T_H	อุณหภูมิด้านร้อน
T_C	อุณหภูมิด้านเย็น
T_s	อุณหภูมิของพื้นผิว
T_∞	อุณหภูมิของไหล
V_C	ปริมาตรอัดตัว
V_E	ปริมาตรขยาย
V_R	ปริมาตรของรีเจนเนอเรเตอร์
V_{DC}	ปริมาตรตายของปริมาตรการอัดตัว
V_{DE}	ปริมาตรตายของปริมาตรขยาย
V_{SD}	ปริมาตรการกวาดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
V_{SP}	ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง
W_C	งานที่เกิดจากการอัดตัวของสารทำงาน
W_E	งานที่เกิดจากการขยายตัวของสารทำงาน
χ_s	อัตราส่วนของปริมาตรกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
a	ความยาวด้านท้ายของกระบอกสูบกำลัง
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน
h_r	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน
\bar{h}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย
α	แอลฟา
β	เบต้า
δ	boundary layer
ε	เอปซิลอน
η	ประสิทธิภาพทางความร้อน
τ	แรงบิดของเครื่องยนต์
ξ	อัตราส่วนกำลังอัด
ζ	อัตราส่วนของปริมาตรอัดตัว
ν	อัตราส่วนของปริมาตรขยายตัว
θ	มุมข้อเหวี่ยง
φ	มุมเฟสการทำงานระหว่างลูกสูบกำลังกับลูกสูบดิสเพลสเซอร์
Δx	ความหนาของแผ่นหิน
d_d	เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
$d_{core,d}$	เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์
$d_{Cy,d}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์
$d_{Cy,p}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของกระบอกสูบ
$d_{in,ht}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของฮีตเตอร์
$d_{in,tube}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่ออากาศ
$d_{in,hs}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของฮีตซิงค์
$d_{rod,d}$	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูดิสเพลสเซอร์
$d_{rod,p}$	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูดึงกำลัง
$d_{out,ht}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฮีตเตอร์
$d_{out,hs}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฮีตซิงค์
$d_{out,tube}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่ออากาศ
d_{wheel}	เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อตุนกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
l_d	ความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
$l_{Cy,d}$	ความยาวของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์
$l_{Cy,p}$	ความยาวของกระบอกสูบกำลัง
$l_{core,d}$	ความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
l_{hs}	ความยาวของฮีตซิงค์
l_{ht}	ความยาวของฮีตเตอร์
$l_{rod,d}$	ระยะระหว่างรูข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์
$l_{rod,p}$	ระยะระหว่างรูข้อเหวี่ยงกำลัง
l_{tube}	ความยาวของท่ออากาศ
l_{wheel}	ความหนาของล้อตุนกำลัง
l_{dis}	ความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
l_p	ความยาวของลูกสูบกำลัง
J_p	ความยาวของปริมาตรตายของกระบอกสูบกำลัง
J_0	ระยะชักของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
$V_{Cy,p}$	ปริมาตรภายในกระบอกสูบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน แหล่งพลังงานทดแทนเป็นเรื่องหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งพลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้พลังงานเหล่านี้ เพื่อดำรงชีวิตเป็น อย่างมาก โดยพลังงานเหล่านี้ส่วนใหญ่นำมาใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีเครื่องยนต์สเตอร์ลิง จะเปลี่ยน พลังงานความร้อน เป็นพลังงานกล สามารถนำไปประยุกต์ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถูกประดิษฐ์ขึ้นเป็นเครื่องแรกในปี 1816 โดย Robert Sterling เป็น เครื่องยนต์ความร้อนสันดาปภายนอก ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อน เป็นพลังงานกลได้ โดย การทำงานของเครื่องยนต์อาศัยแหล่งความร้อนต่างๆ เช่น ความร้อนจากการเผา ความร้อนจาก แสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อทำให้เครื่องยนต์ทำงาน จึงทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์พลังงาน สะอาด เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะอาศัยความต่างทางความร้อน เพื่อทำให้เครื่องยนต์ทำงาน โดย เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีหลายชนิด ชนิดที่สนใจคือ เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา (Type gamma stirling engine) โดยเครื่องยนต์จะประกอบไปด้วย 2 กระจกสูบ โดยกระจกสูบทั้งสองจะมีการขยาย และหดตัวของอากาศ ทำให้กระจกสูบด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นกระจกสูบด้านร้อน และกระจกสูบอีก ด้านหนึ่ง จะเป็นกระจกสูบด้านเย็น เมื่อกระจกสูบทั้งสองมีความต่างทางความร้อนอย่างชัดเจน เครื่องยนต์ก็สามารถทำงานได้ ซึ่งทางภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้มีการศึกษาวิจัยและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมาแล้ว 6 รุ่น ซึ่ง ปัญหาของรุ่นที่ 6 คือเครื่องยนต์มีระยะเวลาในการทำงานที่นานกว่ารุ่นก่อน แต่มีรอบการทำงานต่ำ กว่ารุ่นก่อนๆ จึงยากที่จะนำเครื่องยนต์ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

โครงการพิเศษเล่มนี้จึงสนใจที่จะศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา เพื่อให้มีระยะเวลาในการทำงานที่นานขึ้น และสามารถมีกำลังรอบที่สูงขึ้นได้ โดยอาศัยหลักการทำให้ กระจกสูบทั้งสองฝั่ง มีความต่างทางความร้อนอย่างชัดเจน และทำให้สัดส่วนกำลังมีความสมดุลมาก ขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ดีขึ้น และสามารถนำเครื่องยนต์ไปประยุกต์ใช้ได้ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบ และทำการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยโปรแกรม solidwork เพื่อหาค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์
- 2) เพื่อพัฒนา และสร้างล้อเกียร์กระตุ้นกำลังเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา
- 3) เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ศึกษาหลักการงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้อำนวยการ

- 2) ศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ในด้านความร้อน เพื่อสามารถเพิ่ม

ไม่ว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ให้มีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ในด้านล้อยนต์กำลัง เพื่อสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์
- 4) ออกแบบ และสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ด้วยโปรแกรม solidwork
- 5) จำลองการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ด้วยโปรแกรม solidwork เพื่อหาค่าตัวต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์
- 6) ทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
- 7) วิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

ปีการศึกษา	2560						2561				
แผนการดำเนินงาน	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.ศึกษาหลักการ ทำงาน											
3.ออกแบบและ สร้างชิ้นงาน											
4.ทดสอบการ ทำงานของ เครื่องยนต์											
5.วิเคราะห์ สมรรถนะของ เครื่องยนต์											
6.รวบรวมข้อมูล จัดทำรูปเล่ม											

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เรียนรู้การใช้งานโปรแกรม Solidwork ในการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง และการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์
- 2) เรียนรู้การใช้เครื่องมือทางเครื่องกล เพื่อผลิตชิ้นงาน
- 3) เรียนรู้การวิเคราะห์เชิง Thermodynamics และ กลศาสตร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ความร้อนระบบปิด 2 จังหวะใช้ความร้อนจากภายนอก และใช้ก๊าซเป็นสารทำงาน ประดิษฐ์ขึ้นเป็นเครื่องแรกในปี 1816 โดย Robert Sterling ติดตั้งในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรุ่นต่อมามีขนาดเล็กลงปลอดภัยและเงียบเป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและตามบ้านเรือน เช่น พัดลม จักรเย็บผ้า และเครื่องสูบน้ำ ส่วนในปัจจุบันนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรุ่นที่ทดลองในปัจจุบันมีความสำเร็จทางด้านสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจ จากการใช้โลหะที่ทนความร้อนสูง ในปัญหาพิเศษเล่มนี้ได้ศึกษาการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อตุ๊กตาลูกช้าง โดยพัฒนาหลักสมดุลของล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง เพิ่มสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ให้มีรอบและ ระยะเวลาการทำงานที่สูงขึ้น

2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องยนต์ความร้อนและกฎของเทอร์โมไดนามิกส์

ลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องยนต์ความร้อน (Heat Engine) คือการทำให้เป็น วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Cycle) ซึ่งจำเป็นต้องมีความแตกต่างของอุณหภูมิเพื่อทำให้เกิดงาน แหล่งความร้อนหรืออ่างเก็บน้ำที่มีพลังงานความร้อน (อุณหภูมิสูง) มีความจำเป็นในการเริ่มต้น วงจรเริ่มจากการที่อากาศดูดความร้อนจากอ่างเก็บน้ำอุณหภูมิสูงระหว่างกระบวนการขยายตัวของ วงจรจากนั้นมันจะพยายามทำให้ตัวมันเย็นโดยการคายความร้อนออกมาโดยอากาศที่อุณหภูมิต่ำ จะดูดความร้อนนั้นและทำตัวเป็นแหล่งรับความร้อน (Heat Sink) หรืออ่างเก็บน้ำที่อุณหภูมิต่ำทุกๆ วงจรของเครื่องยนต์ (Engine Cycle) ต้องการแหล่งเก็บความร้อน (Heat Reservoirs) ที่ 2 อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

กฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (Second Law of Thermodynamic) กล่าวว่าทุกเครื่องยนต์ (Engine) ต้องการแหล่งเก็บความร้อนที่ร้อนกว่า (Hotter Reservoirs) สำหรับเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน (Heat Source) และต้องการแหล่งเก็บความเย็น (Cooler Reservoir) เป็นแหล่งรับความร้อน (Heat Sink) การสันดาบน้ำมันจะได้แก๊สร้อนซึ่งเป็นรูปแบบของแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีแนวโน้มว่าจะใช้งานได้จริงในความเป็นจริงบางเครื่องยนต์อาจทำงานได้โดยการเผาไหม้ น้ำมันเฉพาะ แต่บางเครื่องยนต์สามารถทำงานได้จากแหล่งความร้อนใดก็ได้ แหล่งรับความร้อนที่จำเป็นต่อทุกๆ เครื่องยนต์คืออากาศที่บรรยากาศที่หรือน้ำจากแม่น้ำหรือทะเลสาบ

ลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องยนต์ความร้อนคือเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยการขยายตัว และหดตัวของ working substance ซึ่งอาจเป็นก๊าซต่างๆหรือก๊าซผสมเช่นอากาศก็ได้

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบกระบังลมที่เป่าลมหรืออุปกรณ์อื่นๆที่มีลักษณะคล้ายกันการเปลี่ยนแปลงปริมาตรขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ไปมาของลูกสูบและการเปลี่ยนตำแหน่งนี้เป็น 1 ใน 2 องค์ประกอบหลักของงานซึ่งองค์ประกอบอย่างอื่นที่ 2 ก็คือแรงซึ่งแรงที่กระทำเหนือ

ระยะทางก็คืองานแรงในเครื่องยนต์ได้จากการเคลื่อนที่ขึ้นของลูกสูบอันเนื่องมาจากความดันแก๊สที่กระทำบนพื้นที่ของลูกสูบนั่นเอง

ในส่วนหนึ่งของเครื่องยนต์จะมีการขยายตัวหรือการเพิ่มปริมาตรเกิดขึ้นและในอีกส่วนหนึ่งจะมีการลดปริมาตรหรือการอัดเกิดขึ้นในกระบวนการขยายตัวเครื่องยนต์จะส่งงานไปยังลูกสูบและโดยปกติก็จะส่งต่อไปยังใบพัด (Flywheel) ต่อไปในความสัมพันธ์เชิงกลเช่นเดียวกันกับข้อเหวี่ยงและแท่งเชื่อมต่อ (Connecting Rod) อย่างไรก็ตามในทุกๆ การทำงานของเครื่องยนต์ (Working Engine) งานจะถูกผลิตขึ้นในกระบวนการขยายตัวมากกว่างานที่ต้องการเพื่อใช้ในกระบวนการอัดตัวความแตกต่างของทั้ง 2 คำนี้อีกคือการใช้งานที่เหมาะสมหรืองานสุทธิของวัฏจักรของเครื่องยนต์ (Engine Cycle) นั่นเอง

เดิมแล้วส่วนเกินของพลังงานก็คือพลังงานความร้อนพลังงานที่ดูดซึมความร้อนจากแหล่งเก็บความร้อน (Hot Reservoir) จะมีมากกว่าที่ปล่อยไปที่แหล่งเก็บความเย็น (Cool Reservoir) และส่วนเกินนี้จะปรากฏในรูปของงานเรียกว่ากฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (First Law of Thermodynamic) ซึ่งสำหรับเครื่องยนต์แล้วถูกกำหนดไว้ดังนี้คืองานสุทธิที่ทำโดยเครื่องยนต์ในวัฏจักรที่สมบูรณ์ (Complete Cycle) คือความแตกต่างระหว่างการดูดซึมความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน (Hot Source) และการปล่อยความร้อนสู่แหล่งเก็บความเย็น (Cool Sink) คือ $W = Q_i - Q_o$ ซึ่งก็จะมีกรณีการดูดความร้อนเข้ามาแล้วปล่อยบางส่วนไปที่แหล่งเก็บความเย็น (Cool Sink) และ เปลี่ยนความแตกต่างนี้ไปเป็นงานนั่นเอง

2.1.1 ประสิทธิภาพและกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์

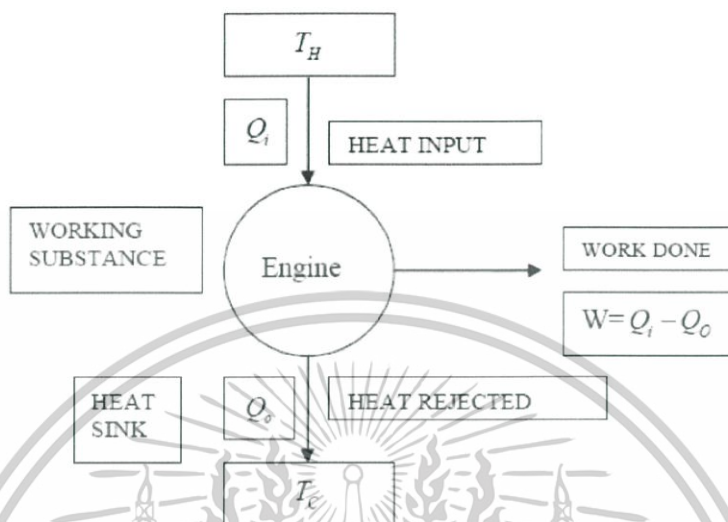
การที่เครื่องยนต์ (Engine) จะดีหรือไม่ดีนั้นขึ้นอยู่กับว่ามันจะสามารถผลิตกำลัง (Power) ได้เพียงพอต่อการทำให้เกิดงานได้เร็วแค่ไหนมันจะต้องใหญ่และหนักขนาดไหนต้องนำเชื้อถือนขนาดไหนต้องผลิตยากแค่ไหนและประสิทธิภาพที่จะเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นงานจำเป็นต้องมีมากแค่ไหน การพิจารณาสิ่งเหล่านี้ค่อนข้างที่จะขึ้นอยู่กับการใช้เครื่องยนต์ซึ่งการประยุกต์ในเครื่องยนต์ชนิดหนึ่งอาจไม่สำคัญสำหรับเครื่องยนต์ชนิดอื่นๆ เลยก็เป็นได้แต่เครื่องยนต์เกือบทุกชนิดที่ประสิทธิภาพมีความสำคัญไม่มีใครที่ต้องการสูญเสียน้ำมันหรือการเผาไหม้เกินความจำเป็น ประสิทธิภาพคือการวัดว่าเครื่องยนต์จะสามารถให้งานออกมาเท่าไรสำหรับการให้ความร้อนหรือน้ำมันเพียงเล็กน้อยมันคือสัดส่วนของงานที่เครื่องยนต์ผลิตต่อความร้อนขาเข้า (Input) ที่ใช้ในการผลิตงาน

$$E_f = \frac{W}{Q_i} \quad (1)$$

โดย ค่า E_f มักแสดงในรูป %

ในความเป็นจริงแล้วไม่มีเครื่องยนต์ไหนที่จะให้ประสิทธิภาพได้ 100 % แม้แต่ลูกสูบที่ดีที่สุดก็ยังไม่สามารถผนึก (Seal) ได้อย่างสมบูรณ์การรั่วไหลของวาล์วและการเกิดแรงเสียดทาน (Friction) ในทุกแห่งที่มีการเคลื่อนที่สวนทางกันแต่ที่ข้อบกพร่องเหล่านี้ก็อยู่ภายใต้กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์อย่างที่เห็นตอนต้นว่ากฎข้อที่ 2 ต้องการความร้อนบางส่วนไปปล่อยออกที่แหล่งเก็บความเย็น (Cool Reservoir) เสมอดังนั้นความร้อนทั้งหมดที่ดูดมาจากแหล่งเก็บความร้อน (Hot Reservoir) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทางห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

จะไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นงานได้ทั้งหมดนั่นหมายความว่า E_f จะไม่สามารถเท่ากับ 100% สำหรับเครื่องยนต์ใดก็ตาม



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นงานและมีการคายความร้อนเกิดขึ้น

มันอาจจะแปลกที่ไม่มีเครื่องยนต์ใดๆแม้แต่เครื่องยนต์ในอุดมคติ (Ideal Engine) ที่สามารถเปลี่ยนความร้อนที่ดูดซึมมาทั้งหมดไปเป็นงานได้ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ค่าโดยค่า E_f ที่ดีที่สุดนั้นขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างการเดินเครื่องยนต์ (Operate Engine) รู้จักกันในชื่อ *carnot* $E_f = \frac{T_H - T_C}{T_H}$; T_H และ T_C คืออุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อน (Heat Source) และแหล่งรับความร้อน (Heat Sink) ตามลำดับมีหน่วยเป็นเคลวิน (Kelvin)

จากสูตรจะแสดงให้เห็นว่ายิ่ง ΔT_H มากเท่าไรก็จะยิ่งได้ E_f มากขึ้นเท่านั้นดังนั้นหากมีเครื่องยนต์ (Engine) ที่กำลังเดินเครื่องอยู่และเราสามารถทำให้มันร้อนขึ้นได้มากเท่าไรมันยิ่งจะทำให้ค่า E_f มากขึ้นเท่านั้นสรุปคือทุกสิ่งจะดีขึ้นเมื่อ ΔT_H ของแหล่งกำเนิดความร้อนและแหล่งรับความร้อนต่างกันมากๆ แต่ต้องจำไว้เสมอว่า *carnot* E_f เป็นทฤษฎีที่มีขีดจำกัดสูงกว่าการทำงานจริงแม้ว่ามันไม่สามารถสำเร็จจุล่งไปได้เนื่องมาจากข้อบกพร่องที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ของเครื่องยนต์จริงโดยในความเป็นจริงแล้วจำเป็นต้องดูแลเอาใจใส่มากๆ ในขณะที่เครื่องยนต์ทำงานเพื่อให้ได้สัดส่วนคาร์โน (Carnot) ที่เหมาะสม

ขั้นแรกในการได้มาซึ่งประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือพยายามหลีกเลี่ยงการสูญเสียความร้อนโดยเปล่าประโยชน์ (Heat Waster) หรือการลัดวงจร (Short Circuit) โดยตรงปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาในเครื่องยนต์หรือในวัฏจักร (Cycle) ที่ทำให้ความร้อนผ่านจากแหล่งเก็บความร้อน (Hot Reservoir) ไปยังแหล่งเก็บความเย็น (Cold Reservoir) โดยปราศจากงานที่เกิดจากอากาศซึ่งอยู่ภายในเครื่องยนต์ในแต่ละ cycle ส่วนของความร้อนที่ดูดซึมจากเครื่องยนต์อันก่อนเพื่อกระบวนการขยายตัวจะไปอุ่นเครื่อง (Warm Up) วัสดุทรงกระบอกและในขั้นสุดท้ายของการขยายตัวความร้อนไม่ว่าจะถูกปล่อยไปยังแหล่งรับความร้อนเพื่อทำวัสดุทรงกระบอกเย็นตัวลง (Cool Down) พลังงานไปใช้

ความร้อนนี้จะไม่ผลิตงานใดๆโดยมันจะผ่านเข้าไปยังโลหะของเครื่องยนต์ (Engine Metal) และผ่านออกไปมีเพียงแค่การแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายในเท่านั้นที่จะทำให้เกิดงานได้นอกจากนั้นจะถือว่าเป็นสิ่งที่ไม่ใช่ประโยชน์ (Waste)

2.1.2 ลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling Engine) เครื่องยนต์สเตอร์ลิงหรือเครื่องจักรสเตอร์ลิง (Stirling Engine) คือเครื่องยนต์สันดาปภายนอกที่สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย ขอให้มีแหล่งพลังงานความร้อน เครื่องยนต์ก็สามารถทำงานได้ ถูกสร้างขึ้นโดย Robert Stirling เมื่อปี ค.ศ. 1816 โดยจะมีก๊าซบรรจุอยู่ในกระบอกสูบ ทำงานโดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อความร้อนในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นจะทำให้อากาศในกระบอกสูบขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเย็นให้กับกระบอกสูบด้านตรงข้ามก็จะทำให้อากาศหดตัว ทำให้เกิดแรงดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับไปมาที่อยู่ภายในกระบอกสูบ เกิดเป็นพลังงานกลหรืองานอย่างต่อเนื่อง โดยความร้อนจะถูกป้อนให้กับเครื่องยนต์ทางด้านใดด้านหนึ่งแล้วผลิตงานออกมาตรงเท่าที่ที่ยังคงมีความร้อนป้อนอยู่ เครื่องจักรสเตอร์ลิงมีการทำงานเป็นลักษณะวนไปมา ที่เรียกว่า วัฏจักรสเตอร์ลิงในปัจจุบันเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เรือดำน้ำหรือเครื่องจ่ายพลังงานสำรองของเรือยอช เป็นต้น

2.1.3 คุณสมบัติของก๊าซที่ทำให้เกิดงานทางกลศาสตร์

- 1) ก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในกระบอกสูบของเครื่องจักรสเตอร์ลิง จะถูกผนึกอยู่ภายใน ไม่สามารถรั่วไหลออกมาได้ จึงไม่ต้องมีวาล์วไอเสีย เหมือนกับเครื่องจักรก๊าซโซลีน หรือดีเซล และไม่มีการจุดระเบิดของหัวเทียนหรือน้ำมันเชื้อเพลิง เครื่องจึงเดินเงียบมาก
- 2) พลังงานของเครื่องจักรสเตอร์ลิงมาจากความร้อนภายนอกกระบอกสูบ จึงไม่มีการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ
- 3) ถ้าให้ปริมาตรของก๊าซที่อยู่ในกระบอกสูบคงที่ เมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซ ความดันของก๊าซจะเพิ่มขึ้น
- 4) ถ้าให้ความดันของก๊าซที่อยู่ในกระบอกสูบคงที่ เมื่อลดอุณหภูมิของก๊าซ ปริมาตรในกระบอกสูบลดลง อุณหภูมิของก๊าซจะเพิ่มขึ้น

2.1.4 วัฏจักรสเตอร์ลิง ในทางอุดมคติ

เครื่องจักรสเตอร์ลิงมีการทำงานเป็นลักษณะวนไปมาภายใต้อุณหภูมิต่ำและสูง เรียกว่า วัฏจักรสเตอร์ลิง ซึ่งมีความแตกต่างจากเครื่องจักรสันดาปภายใน ดังต่อไปนี้

ก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในกระบอกสูบของเครื่องจักรสเตอร์ลิง จะอยู่ในระบบปิดอยู่ภายในกระบอกสูบ ไม่สามารถรั่วไหลออกมาได้ จึงไม่ต้องมีวาล์วไอเสีย เหมือนกับเครื่องจักรก๊าซโซลีน หรือดีเซล และไม่มีการจุดระเบิดของหัวเทียนหรือน้ำมันเชื้อเพลิง เครื่องจึงเดินเงียบมาก

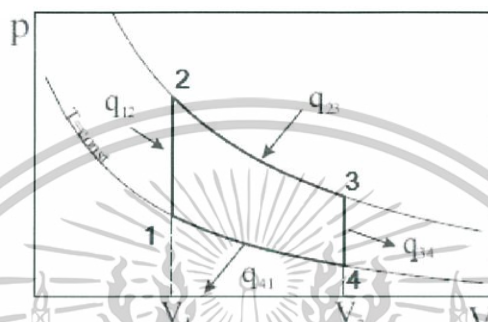
พลังงานของเครื่องจักรสเตอร์ลิงมาจากความร้อนภายนอกกระบอกสูบ จึงไม่มีการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ

เครื่องจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ คือ ไม่มีความฝืดหรือแรงเสียดทานจุดเคลื่อนที่ต่างและชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ต้องมีมวลเบา ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้จากแผนภาพ P-V ปริมาตรภายในเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการหาค่าภายในของรูปทรงเรขาคณิต โดยเริ่มต้นจะสามารถหาค่าความดันของระบบเมื่อมีการกำหนดค่าของปริมาตร (V) มวลของก๊าซ (m)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

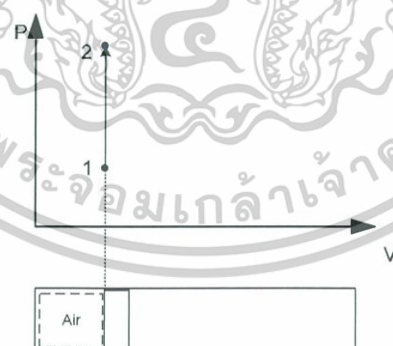
และค่าอุณหภูมิ (T) ค่าความดัน P ของระบบจะสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีก๊าซในอุดมคติซึ่งแสดงได้ดังสมการ $PV = nRT$

วัฏจักรที่ใช้ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ประกอบไปด้วยวัฏจักรย้อนกลับได้แบบอุณหภูมิคงที่สองกระบวนการ (2 Isothermal process) และวัฏจักรปริมาตรคงที่สองกระบวนการ (2 Isovolumetric process) เป็นวัฏจักรที่มีประสิทธิภาพเข้าใกล้วัฏจักรคาร์โนต์ แสดงแผนภาพ P-V ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 แผนภาพ P-V ของวัฏจักรสเตอร์ลิง

กระบวนการที่ 1-2 คือ ลูกสูบกำลังอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน ขั้นนี้เป็นการให้ความร้อนกับอากาศภายในกระบอกสูบโดยการเคลื่อนที่ของลูกสูบไล่ (Displacer piston) เพื่อให้อากาศส่วนใหญ่ไปรวมอยู่ทางด้านร้อน อากาศได้รับความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและความดันเพิ่มขึ้นขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการให้ความร้อนที่ปริมาตรคงตัว (Isovolumetric heating process)

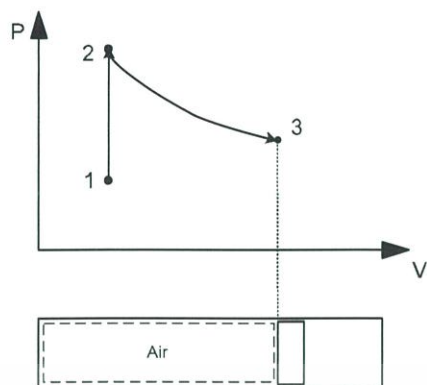


รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการ Isovolumetric heating process

กระบวนการที่ 2-3 คือ เมื่ออากาศทางด้านร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความดันเพิ่มขึ้น เกิดแรงดันลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ไปที่ศูนย์ตายล่าง อากาศยังคงได้รับความร้อนขณะที่ปริมาตรของอากาศเพิ่มขึ้น ความดันลดลงโดยที่อุณหภูมิคงตัว ขั้นที่ 2 เป็น กระบวนการขยายตัวที่อุณหภูมิคงตัว (Isothermal expansion process)

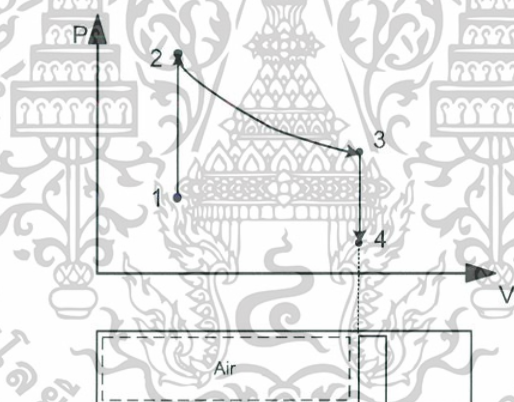
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการ Isothermal expansion process

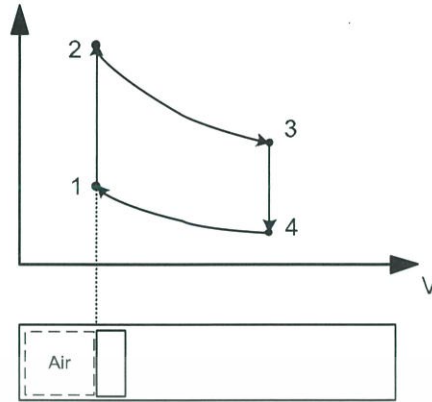
กระบวนการที่ 3-4 คือ ผลของความต่างเฟส 90° ระหว่างลูกสูบทั้งสองทำให้ลูกสูบไล่เคลื่อนที่และไล่อากาศ จากด้านร้อนไปทางด้านเย็นเพื่อทิ้งความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมทำให้อุณหภูมิของอากาศลดลง ความดันลดลงลูกสูบกำลังอยู่ที่ศูนย์ตายล่าง ขั้นที่ 3 เป็นกระบวนการระบายความร้อนที่ปริมาตรคงตัว (Isovolumetric cooling process)



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการ Isovolumetric cooling process

กระบวนการที่ 4-1 คือ ลูกสูบกำลังเลื่อนไปที่ศูนย์ตายบนอากาศถูกอัดให้มีปริมาตรเล็กลง และระบายความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมด้วยอุณหภูมิคงตัว ผลของความต่างเฟส 90° ทำให้ลูกสูบไล่เคลื่อนที่ไล่อากาศจากด้านเย็นกลับไปทางด้านร้อน แล้วเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก็กลับไปสู่จุดตั้งต้นขั้นที่ 1 ซึ่งขั้นที่ 4 นี้เป็นกระบวนการอัดที่อุณหภูมิคงตัว (Isothermal compression process)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการ Isothermal compression process

งานที่ได้ออกมาต่อวัฏจักรก็คือพื้นที่ 1-2-3-4 ของ PV diagram ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งหาโดยการคำนวณทางแคลคูลัส (Calculus)

งานจะได้มาจากกระบวนการขยายตัวและอัดตัวที่อุณหภูมิคงที่เท่านั้นดังนั้นงานสุทธิจึงเท่ากับผลรวมของขั้นตอนการขยายตัวและอัดตัวที่อุณหภูมิคงที่ที่สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = W_{\text{exp}} + W_{\text{cmp}} \quad (2)$$

โดยที่ W_{exp} คือ งานที่ได้จากกระบวนการขยายตัว (J)

W_{cmp} คือ งานที่ได้จากกระบวนการอัดตัว (J)

และจากกฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal Gas)

$$PV = nRT \quad (3)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ว่า

$$P = \frac{nRT}{V} \quad (4)$$

เมื่ออุณหภูมิของแก๊สคงที่ (Isothermal process) จะได้

$$W = \int_{V_i}^{V_f} P dv \quad (5)$$

แทนค่า W ลงในสมการ (4) จะได้

$$W = nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{V}{dV} \quad (6)$$

อินทิเกรตได้

$$W = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \quad (7)$$

โดยที่ V_f คือ ปริมาตรสุดท้าย (m^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

จากรูปที่ 2.2 เริ่มจากจุดที่ 2 ไปยังจุดที่ 3 จะได้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_{\text{exp}} = nRT_H \ln \left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \right) = nRT_H [\ln(V_{\text{max}}) - \ln(V_{\text{min}})] \quad (8)$$

และจากจุดที่ 4 ไปยังจุดที่ 1

$$W_{\text{cmp}} = nRT_C \ln \left(\frac{V_{\text{min}}}{V_{\text{max}}} \right) = nRT_C [\ln(V_{\text{min}}) - \ln(V_{\text{max}})] \quad (9)$$

จากนั้นแทนค่า W_{exp} และ W_{cmp} ลงในสมการ (2) จะได้

$$W = nR(T_H - T_C) \ln \left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \right) \quad (10)$$

$$\text{efficacy} = \frac{Q_i - Q_o}{Q_i} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (11)$$

โดยเหมือนกับวัฏจักรคาร์โนตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งหากเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิมากเท่าใดจะยิ่งทำให้เกิดงานมากขึ้นเท่านั้น

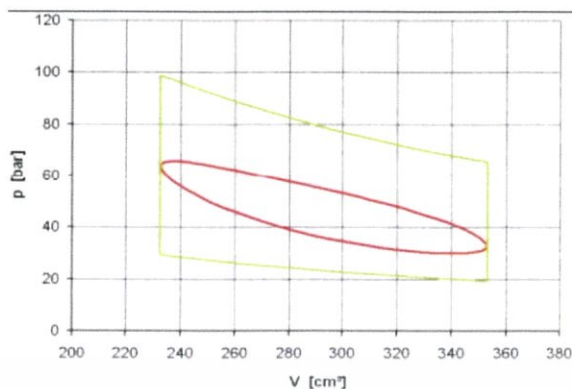
โดย Q_i คือ พลังงานที่ไหลเมื่อเกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่ T_H

Q_o คือ พลังงานที่ไหลเมื่อเกิดการหดตัวที่อุณหภูมิคงที่ T_C

ไม่เพียงแต่ให้ประสิทธิภาพสูงเท่านั้นวัฏจักรของสเตอร์ลิงยังให้งานที่เสียบและสะอาดนอกจากนี้แล้วยังมีการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเรื่อยๆ เกือบเท่าตามทฤษฎีดังนั้นจึงถือได้ว่าหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นหลักการที่สำคัญสำหรับเครื่องยนต์ความร้อน

จากวัฏจักรอุดมคติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ได้กล่าวมาด้านบนจะเห็นว่า จะเกิดความไม่ต่อเนื่องระหว่างขั้นตอนการเคลื่อนที่ของลูกสูบและตัวแทนที่อากาศ แต่ในความเป็นจริงแล้วจะพบว่าการเคลื่อนที่ของลูกสูบและตัวแทนที่อากาศจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพและกำลังของเครื่องยนต์ลดลง โดยรูปที่ 2.6 เป็นรูปที่แสดงให้เห็นความแตกต่างของการดำเนินการระหว่างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจริง และเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในอุดมคติโดยเส้นกราฟด้านนอกแสดงให้เห็นกระบวนการอุดมคติซึ่งสามารถสังเกตอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรได้ ส่วนเส้นกราฟด้านในเป็นเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมซิมูเลชัน (Simulation Program) ซึ่งรวมไปถึงการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอเดียบาติก (Adiabatic Process) การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรอย่างต่อเนื่อง (Continuous Volume Changes) และการสูญเสียเนื่องจากความดัน (Pressure Loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

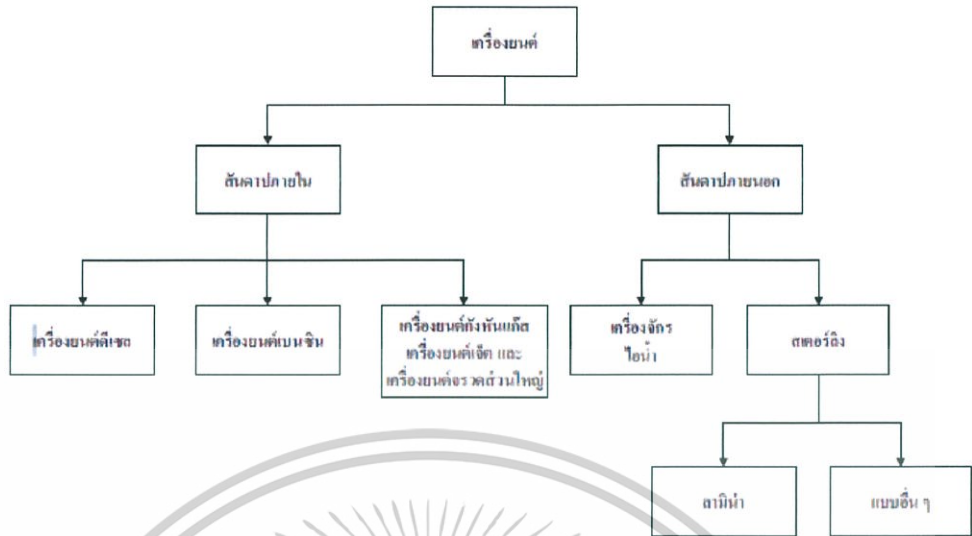


รูปที่ 2.7 ความแตกต่างของวัฏจักรการดาเนินงานของเครื่องยนต์เสตอริงจริงและเครื่องยนต์อุดมคติ

2.2 เครื่องยนต์สันดาปภายนอก (External Combustion Engine)

เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอกหรือเครื่องยนต์สันดาปภายนอกกล่าว คือเครื่องที่ใช้สาร ตัวกลาง สำหรับเปลี่ยนพลังงานความร้อน ไปเป็นพลังงานกลจากภายนอกซึ่ง นั้นหมายความว่า เครื่องยนต์จะเผาไหม้ภายนอกกระบอกสูบ เช่น เครื่องจักรไอน้ำ (Steam Engine) จะใช้น้ำเป็นสาร ตัวกลาง เครื่องยนต์อากาศร้อน (Hot Air Engine) และเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไนน์วัฏจักรปิด (Closed Cycle Gas Turbine) ซึ่งใช้อากาศเป็นสารตัวกลางโดยทั่วไปเครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอกที่พบเห็น บ่อยๆ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า รถไฟสมัยเก่า เป็นต้น วิศวกรรมเครื่องกล การพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายนอกที่เห็นค่อนข้างได้ชัด คือ เครื่องจักรไอน้ำโดยน้ำ เมื่อ ได้พบความร้อนจะเกิดความดันและมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดพลังงานขึ้นในตัวเองพลังงานดังกล่าวนี้ เองสามารถนำไปผลักดันลูกสูบให้เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งก็คือ พลังงานกลนั่นเองบุคคลแรกที่สร้าง เครื่องต้นแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำ คือ ศาสตราจารย์ปาปิน (Papin) ชาวเยอรมัน ปี ค.ศ. 1690 หรือ ปี พ.ศ. 2233 เป็นวิธีนำ กำลังจากไอน้ำมาใช้งานด้วยวิธีง่ายๆ เครื่องยนต์กำลังของปาปินประกอบด้วยลูกสูบที่ขึ้นลงในกระบอกสูบเมื่อให้ความร้อนแก่น้ำ ซึ่งน้ำ จะร้อนขึ้นและกลายเป็นไอจะมีพลังผลักดันลูกสูบขึ้นข้างบนจนเมื่อน้ำ ไอน้ำจะเย็นตัวและกลั่นตัวลูกสูบจะตกลงข้างล่างตามเดิม ต่อมานิวคอมแมน ชาวอังกฤษ ปี ค.ศ.1780 (พ.ศ.2323) และ เจมส์ วัตต์ ชาวอังกฤษ ค.ศ. 1900 (พ.ศ. 2433) ได้พัฒนาเครื่องจักรไอน้ำแยกยูนิทหม้อน้ำและ พัฒนากลไกที่ใช้ควบคุมให้เครื่องจักรไอน้ำสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

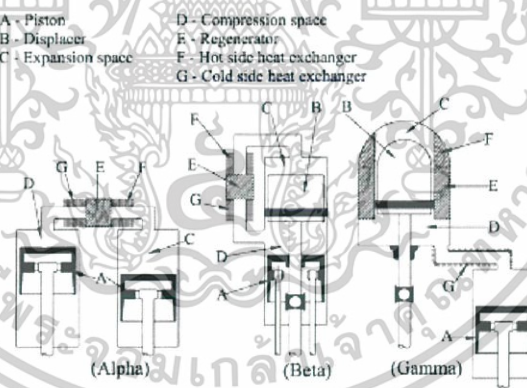
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ผังของเครื่องยนต์สันดาปภายในและภายนอก

2.2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา

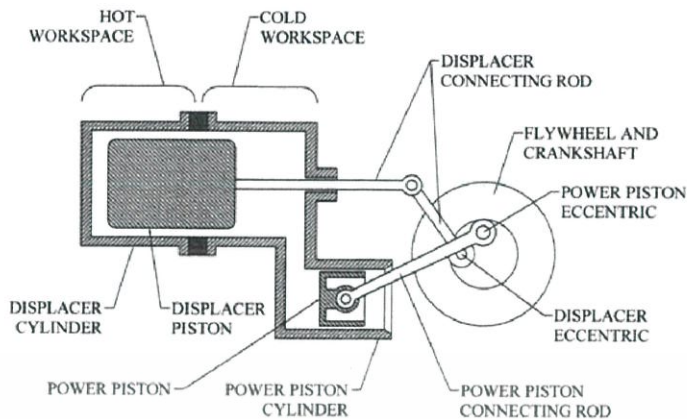
ลักษณะรูปร่างของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ที่มีใช้ในปัจจุบันเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือแบบ อัลฟา เบต้า และแกมมา



รูปที่ 2.9 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบต่าง ๆ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแกมมามีความคล้ายคลึงกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง Beta ยกเว้นว่า displacer มีถึงแยกต่างหากซึ่งจะเชื่อมต่อโดยตรงกับลูกสูบพลังงาน ลูกสูบเหล่านี้จะเชื่อมต่อไปยังล้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา

2.3 สภาวะและสมดุล

สภาวะ (state) หมายถึงสภาวะของระบบที่ถูกกำหนดโดยชุดของสมบัติ (set of properties) ของระบบ เช่น อุณหภูมิ ความดัน และพลังงานของระบบ เป็นต้น โดยที่สภาวะหนึ่งๆ สมบัติของระบบจะมีค่าคงที่หากมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเพียงอย่างหนึ่งอย่างใดจะถือว่าระบบมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะไปสู่สภาวะใหม่ทันที ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มีของไหลทำงานอยู่ในกระบอกสูบ ถ้าหากลูกสูบมีการขยายตัวทำให้ปริมาตรภายในระบบเพิ่มขึ้นจาก V_1 ไปเป็น V_2 จะถือว่าระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาวะใหม่ในขณะที่มวลและอุณหภูมิคงที่ก็ตาม

สมดุล (Equilibrium) หมายถึง สภาวะที่ไม่มีแรงผลักดัน (driving force) ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ โดยระบบที่อยู่ในสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของสมดุลต่อไปนี้ทั้งหมดคือ สมดุลทางความร้อน สมดุลทางกล สมดุลทางเคมี และสมดุลเฟส

สมดุลทางความร้อน (thermal equilibrium) หมายถึง สภาวะที่ภายในระบบมีอุณหภูมิเท่ากันทั่วทั้งระบบ ลักษณะของระบบที่มีสมดุลทางความร้อนและไม่มีสมดุลทางความร้อน

สมดุลทางกล (mechanical equilibrium) หมายถึง สภาวะที่ภายในระบบมีความดันเท่ากันทั่วทั้งระบบอย่างไรก็ตามความแตกต่างของความดันในระบบอาจเกิดจากระดับความสูงซึ่งเป็นผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วง แต่โดยทั่วไปค่าความแตกต่างจากสาเหตุนี้จะมีค่าต่ำมาก จึงไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา

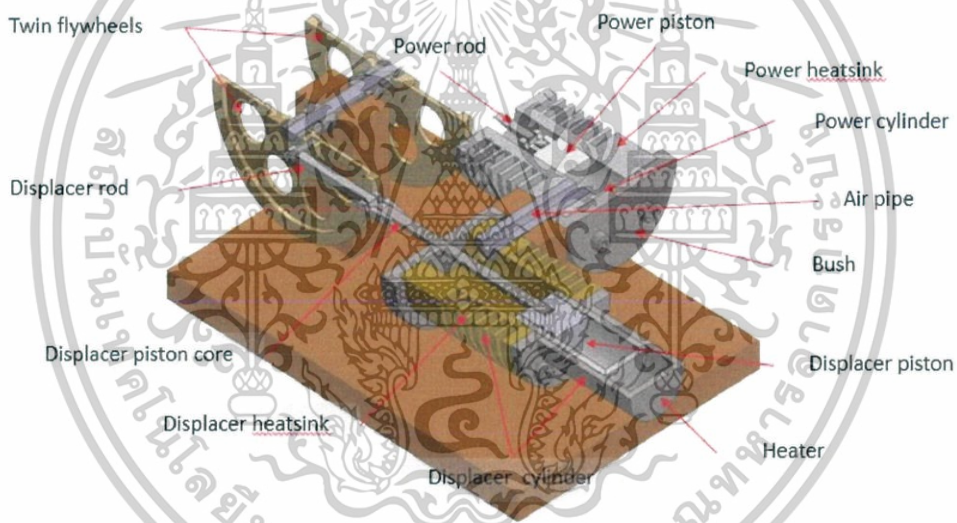
สมดุลทางเคมี (chemical equilibrium) หมายถึง สภาวะที่ของไหลทำงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี

สมดุลเฟส (phase equilibrium) เป็นสมดุลที่ใช้พิจารณาสำหรับระบบที่มีมากกว่า 1 เฟส โดยสมดุลเฟสหมายถึงสภาวะที่มวลในแต่ละเฟสเข้าสู่สมดุลและไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป

2.4 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาประกอบด้วยลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง ทั้งสองลูกสูบแยกจากกันซึ่งจะมีการออกแบบง่าย ๆ โดยทั้งสองลูกสูบนี้อาจจะเชื่อมต่อกัน การไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกกันของกระบอกสูบนี้ทำให้มีการแยกกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน ที่เกี่ยวข้องกับกระบอกสูบดีสเพลสเซอร์และงานที่เกิดขึ้นจากพื้นการบีบอัดและขยายตัวของ ลูกสูบ กำลัง โดยทั่วไปกระบอกสูบดีสเพลสเซอร์จะมีขนาดใหญ่กว่ากระบอกสูบของลูกสูบกำลังหลายเท่า เป็นผลให้โอกาสการเกิดปริมาตรตายนั้นจะมีมากกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาหรือแบบเบต้า แม้ว่ากระบอกสูบของลูกสูบทั้งสองนี้จะแยกออกจากกันแต่จะมีเพียงกระบอกสูบหนึ่งเท่านั้นที่ต้อง (มี ลูกสูบกำลังอยู่ภายใน) ป้อนกันการรั่ว นอกจากนี้การแยกกันของกระบอกสูบทั้งสองยังทำให้ลูกสูบกำลัง ปราศจากปัญหาในเรื่องการสะสมทางความร้อนส่งผลให้มีความแปรปรวนที่เป็นผลจากขนาดกระบอก สูบน้อยลงเนื่องจากการสร้างหรือการขยายตัว การป้อนกันการรั่วนี้จะง่ายกว่าเครื่องยนต์ชนิดอื่นๆ ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกแยกออกจากกระบอกสูบกำลังแต่ก็จะรวมอยู่กับกระบอกสูบดีสเพลส เซอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าซึ่งการออกแบบและการจัดวางตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะกลายเป็นเรื่องง่าย กว่า จึงทำให้สามารถใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่กว่าและดีกว่าและสามารถใช้ในพื้นที่ที่ ต้องการได้



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา

จากรูปที่ 2.11 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา สามารถแบ่งส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์ ได้ดังนี้

- (1) กระบอกลูกสูบดีสเพลสเซอร์ (Displacer cylinder) คือ กระบอกสูบที่มีลูกสูบดีสเพลส เซอร์อยู่ภายในซึ่งจะเชื่อมต่อกับฮีตเตอร์ (Heater)
- (2) ลูกสูบดีสเพลสเซอร์ (Displacer piston) คือ ลูกสูบที่ทำหน้าที่สำหรับไล่อากาศจากฝั่งร้อน ไปยังฝั่งเย็น
- (3) ฮีตซิงค์ (Heatsink) คือ ส่วนที่ช่วยในการระบายความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง มีทั้ง ด้านร้อน และด้านเย็น

(4) ฮีตเตอร์ (Heater) คือ ส่วนที่รับความร้อนโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อใช้ใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5) แกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer piston core) คือ ส่วนสำคัญในการรับแรงและส่งแรงให้ข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์

(6) ลูกสูบกำลัง (Power piston) คือ ลูกสูบสำหรับขับเคลื่อนกำลังเพื่อส่งต่อไปยังล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง

(7) ครอบสูบกำลัง (Power cylinder) คือ ครอบสูบที่มีลูกสูบกำลังอยู่ภายในซึ่งจะต้องเชื่อมต่อกับครอบสูบดิสเพลสเซอร์

(8) ข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์ (Power rod) คือ ส่วนที่เชื่อมต่อกับแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์และล้อเกียร์เพื่อ ถ่ายทอดกำลัง

(9) ก้านลูกสูบกำลัง (Power core) คือ ส่วนสำคัญในการรับแรงและส่งแรงให้ข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง

(10) ข้อเหวี่ยงสำหรับลูกสูบกำลัง คือ ส่วนที่เชื่อมต่อกับก้านลูกสูบกำลังและล้อเกียร์เพื่อ ถ่ายทอดกำลัง

(11) ล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง (Flywheels) คือ ส่วนที่ใช้ในการสะสมพลังงานจลน์ซึ่งถือว่าเป็นเอาท์พุทของระบบ

(12) บูช (Bush) คือ ตัวที่ใช้ซีลเพื่อป้องกันการรั่วของอากาศภายในครอบสูบเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความดันภายในครอบสูบ

(13) ฐานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา คือ ส่วนที่ใช้ยึดครอบสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยภายในจะมีท่อที่ใช้เชื่อมต่อเพื่อและเปลี่ยนอากาศระหว่างครอบสูบดิสเพลสเซอร์และครอบสูบกำลัง

(14) ฐานรับล้อเกียร์ คือ ส่วนที่ใช้ยึดล้อเกียร์กระตุ้นกำลังกับตัวข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์และข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง

2.5 ทฤษฎีทางวัสดุศาสตร์

วัสดุ (Materials) เป็นสารที่มีคุณสมบัติต่างๆซึ่งจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ในงานโครงสร้างการผลิตเครื่องมือ อุปกรณ์ หรือผลิตภัณฑ์โดยคุณสมบัติของวัสดุนั้น จะแสดงลักษณะเฉพาะตัวเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ หรืออยู่ในสภาวะที่ต่าง ๆ กัน เช่น ความแข็งแรงดึง (tensile strength) ของวัสดุ จะสามารถวัดได้จากความต้านทานของวัสดุเมื่อมีแรงดึงมากระทำ เป็นต้น

วัสดุศาสตร์ก็คือ การนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมในการศึกษาเพื่ออธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบพื้นฐานของวัสดุ และการจัดเรียงตัวในระดับอะตอมและสมบัติของวัสดุ ซึ่งความเข้าใจดังกล่าวนี้จะนำไปตอบคำถามที่ว่าเมื่อนำไปผ่านกระบวนการผลิตแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสมรรถนะในการใช้งานอย่างไร ความรู้ที่นำมาใช้นั้นก็จะมีลักษณะเป็นสหวิทยาการคือการใช้ความรู้ในหลายๆ แขนงมารวมกันในการทำงาน และยังในปัจจุบันที่วัสดุศาสตร์ได้เข้าไปมีบทบาทอย่างมากภายในเกือบจะทุกผลิตภัณฑ์ ดังนั้น วัสดุศาสตร์ในปัจจุบันจึงยังต้องใช้ความรู้ในหลายแขนงวิชา ไม่ว่าจะเป็นความรู้ทางฟิสิกส์ เคมี วิศวกรรม ชีววิทยา ไฟฟ้า คณิตศาสตร์ หรือการแพทย์ เข้ามารวมกันเพื่อแก้ปัญหาหรืออธิบายสิ่งต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่องกับวัสดุและสมบัติที่สนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ภายใต้การดำเนินงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นมีผลจากคุณท์ภูมิ

ไม่ว่ากระบวนการทางความร้อน การถ่ายเทความร้อน ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้ในส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ต้องไปใช้

มีคุณสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสม เช่น สามารถทนความร้อนได้สูงและถ่ายความร้อนได้ดี อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์อีกด้วย เช่น น้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในลูกสูบต้องเบา เป็นต้น

2.5.1 การเลือกใช้วัสดุ

จำเป็นต้องเข้าใจถึงองค์ประกอบหรือสิ่งที่มีอิทธิพล ต่อสมบัติของวัสดุ เพื่อให้วิศวกรมีความรู้ในด้านต่างๆต่อไปนี้

1. เลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพ และราคา
2. เข้าใจพฤติกรรมของวัสดุระหว่างการใช้งาน และข้อจำกัดของวัสดุ
3. เพื่อสามารถที่จะสร้างวัสดุใหม่ๆ ที่มีคุณสมบัติตามต้องการหรือ สามารถ ปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้ดีขึ้น

2.5.2 แนวทางสำหรับการเลือกวัสดุ

1. คุณสมบัติของวัสดุ (Material's Properties) ในการสร้างแนวทางในการเลือกวัสดุนั้น ฐานข้อมูลวัสดุ (materials database) มีความจำเป็นและจะต้องสามารถตอบคำถามบนพื้นฐานการเลือกวัสดุที่เหมาะสมได้ ฐานข้อมูลวัสดุ จะประกอบไปด้วยตารางที่แสดงถึงคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุ เช่น ค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) ความแข็ง(hardness) และคุณสมบัติทางความร้อน ข้อมูลหรือฐานข้อมูลเหล่านี้สามารถค้นหาได้จากหนังสือคู่มือ (Handbook) เช่น Machine Design และ Modern Plastics เป็นหนังสือคู่มือประจำปี ซึ่งแสดงข้อมูลพื้นฐานของวัสดุ นอกจากนี้ยังมี Metals Handbook ซึ่งเป็นคู่มือที่ออกโดย ASM (American Society for Metals) International หรือสามารถหาได้ตามเว็บไซต์ต่างๆ

2. เกณฑ์ในการเลือกอื่นๆ (Additional selection criteria)นอกจากใช้เกณฑ์คุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งมีจำนวนมากในการตัดสินใจเลือกวัสดุที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทางผู้ออกแบบยังมีเกณฑ์การเลือกอื่นๆ เช่น ความยากง่ายในการจัดหา ง่ายต่อการเปลี่ยนรูปหรือผลิต ความน่าเชื่อถือ คุณภาพ และสมรรถนะ การยอมรับจากลูกค้า แนวโน้มของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

2.5.3 ทองเหลือง (Brass)



รูปที่ 2.12 ทองเหลือง (Brass)

ทองเหลือง คือโลหะผสมชนิดหนึ่งที่มีส่วนประกอบระหว่างทองแดงและสังกะสี โดยสัดส่วนของสังกะสีในทองเหลืองนั้น มีได้ตั้งแต่ร้อยละ 5-45 ปริมาณของสังกะสีที่เปลี่ยนไปในทองแดงนั้นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยอมทำให้ทองเหลืองเปลี่ยนตามไปด้วย ลักษณะโดยทั่วไปของทองเหลืองจะมีสีเหลืองตามชื่อ จึงมีส่วนคล้ายเนื้อทองคำ

ทองเหลืองมีความทนทานต่อสนิม ทนต่อทุกสภาพอากาศ และทนต่อรอยขีดข่วนจากการใช้งานทองเหลืองแบบปกติ ทำให้นิยมใช้ทำเป็นของตกแต่งภายในบ้าน ทองเหลือง เป็นโลหะที่รู้จักกันมาแต่โบราณและมีการผลิตขึ้นเองด้วย โดยการผลิตทองเหลืองนั้นอาศัยการหลอมละลายระหว่างทองแดงกับแร่คาลาไมน์ซึ่ง มีส่วนผสมของสังกะสีทำให้ได้ทองเหลืองออกมา ทองเหลืองมีหลายประเภท ได้แก่ Admiralty brass, Alpha brasses, Alpha-beta brass, Aluminum brass, Arsenical brass, Beta brasses, Cartridge brass, Common brass, DZR brass, Gilding metal High brass, Leaded brass, Low brass, Naval brass, Red brass, Rich low brass, White brass Yellow brass

วัสดุทองเหลือง ที่นำมาใช้ทำอุปกรณ์นิวเมติกส์ อุปกรณ์ลม อย่างเช่น ข้อต่อทองเหลือง ข้อต่อทองเหลือง 2 ทาง, ข้อต่อทองเหลือง 3 ทาง, ข้อต่อ 90 องศา, ข้อต่อตรงทองเหลือง, ปลั๊กอุดทองเหลือง, สวมสายยางทองเหลือง ฯลฯ เป็นต้น

- ข้อดีของทองเหลืองที่มีต่ออุตสาหกรรม

ข้อดีของทองเหลืองที่มีต่ออุตสาหกรรม ทั้งผลิตภัณฑ์ทองเหลืองชนิดแผ่นและผลิตภัณฑ์ทองเหลืองชนิดข้อต่อและตัววาล์วที่มีขนาดและคุณสมบัติต่างๆ กันนั้น สามารถนำไปใช้สำหรับเครื่องจักรผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การผลิตกุญแจ บานพับประตูและป้ายต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำทองเหลืองมาทำเป็นอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ท่อทองเหลือง ข้อต่อทองเหลืองวาล์วทองเหลืองที่นำไปใช้ในระบบนิวเมติกส์ เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องฉีดยาฆ่าแมลง และอุตสาหกรรมยานยนต์ สามารถใช้ผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ได้ หลากหลาย และเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยานยนต์ ที่นำทองเหลืองไปผลิตหม้อน้ำรถยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า ที่นำทองเหลืองไปเป็นชิ้นส่วนไฟฟ้า ใช้ผลิตขดลวดไฟ คัทเอวท์ สวิตช์ไฟ สายเคเบิล Connector อุตสาหกรรมผลิต เช่น ตัววาล์วนิวเมติกส์ ข้อต่อและวาล์วต่างๆ ในระบบนิวเมติกส์และไฮดรอลิก

- คุณสมบัติทองเหลือง

ทองเหลืองเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงและสังกะสี ซึ่งสังกะสีจะละลายในทองแดงได้ โดยให้สารละลายเป็นของแข็ง ปริมาณของสังกะสีที่สามารถละลายได้อยู่ที่ 39% ทองเหลืองแต่ละชนิดที่ทำการผลิตออกมาจะมีปริมาณในการผสมสังกะสีลงไปแตกต่างกันตามความต้องการของผู้ผลิต โดยคุณสมบัติของทองเหลืองที่ดีคือ มีความแข็งแรง ทนทาน มีความเหนียว สามารถทนต่อการถูกกัดกร่อน และทุกสภาพอากาศ อีกทั้งรอยขีดข่วนจากการใช้งานปกติของทองเหลืองด้วย สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตได้แบ่งทองเหลือง ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ทองเหลืองประเภทรีดเป็นแท่ง หรือทองเหลืองประเภทรีดเป็นแผ่น และทองเหลืองประเภทหล่อ ทองเหลืองทั้งสองประเภทนี้สามารถแยกคุณภาพและคุณสมบัติเชิงกลออกได้ตามรายละเอียดคู่มือ ASTM (American Society for Testing and Materials) หรือ JIS (Japanese Industrial-Standards) ที่เป็นมาตรฐานภายใต้ข้อกำหนดที่ตกลงร่วมกันระหว่างผู้ผลิตทองเหลืองภายในประเทศและต่างประเทศเพื่อเป็นการสร้างความเข้าใจให้ตรงกัน ทั้งเรื่องคุณภาพ รูปร่าง น้ำหนัก ฯลฯ ทั้งนี้คุณสามารถขอคำแนะนำเกี่ยวกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าทองเหลืองได้ตามแหล่งซื้อขายทองเหลืองทั่วไป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 อะลูมิเนียม (aluminium)



รูป 2.13 อะลูมิเนียม (aluminium)

อะลูมิเนียม คือธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ Al และมีเลขอะตอม 13 เป็นโลหะหลังทรานซิชันที่มันวาวและอ่อนดัดง่าย และมีคุณสมบัติเด่น คือต่อต้านการออกซิเดชันเป็นเยียม (เนื่องจากปรากฏการณ์ passivation) แข็งแรง และน้ำหนักเบา มีการใช้อะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย และอะลูมิเนียมสำคัญต่อเศรษฐกิจโลกอย่างมาก ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผลิตจากอะลูมิเนียมสำคัญต่ออุตสาหกรรมอากาศยาน และสำคัญในด้านอื่น ๆ ของการขนส่งและการสร้างอาคาร ซึ่งต้องการน้ำหนักเบา ความทนทาน และความแข็งแรง

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบมากบริเวณเปลือกโลก เป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับสามรองจากธาตุซิลิคอน คือพบประมาณ 7.5% โดยมวล อะลูมิเนียมในธรรมชาติอยู่ในรูปของสารประกอบชนิดต่าง ๆ เช่น บอกไซด์ ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) ไครโอไลต์ (Na_3AlF_6) แต่ในธรรมชาติอะลูมิเนียมพบในรูปแร่บอกไซด์เป็นหลัก อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีสีขาวเงินมีความหนาแน่น 2.699 g/cm³ 320 °C นำไฟฟ้าได้ดี และนำได้ดีขึ้นเมื่อมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น มีความว่องไวในการป้องกันไม่ให้ผุกร่อน ต่อไป ทับทิม ไพริน และบุคราคัมที่ใช้เป็นเครื่องประดับ เป็นพลอยประเภทคอร์ันดัมสูตรเคมี คือ Al_2O_3 ซึ่งมีความแข็งแรงรองจากเพชร แต่มีสีต่างกันเพราะมีธาตุอื่นที่เป็นมลทินต่างกัน ถ้ามีโครเมียมออกไซด์ปนอยู่จะมีสีชมพูถึงแดงเข้มเรียกว่า ทับทิม ถ้ามีไทเทเนียมและเหล็กออกไซด์ปนอยู่จะมีสีน้ำเงินเรียกว่า ไพริน และถ้ามีเหล็กออกไซด์ปนอยู่จะมีสีเหลืองเรียกว่า บุคราคัม

- ข้อดี

โลหะอะลูมิเนียมเป็นโลหะเศรษฐกิจที่สำคัญเพราะมีราคาถูก และใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น โลหะเจืออะลูมิเนียม ใช้ทำเครื่องบิน ยานอวกาศ กลอนประตู หน้าต่าง เครื่องใช้ต่าง ๆ ภายในบ้าน นอกจากนี้ อะลูมิเนียมยังใช้ทำสายไฟฟ้า ทำวัสดุห่อของในลักษณะของอะลูมิเนียมแผ่นบางใช้ทำกระป๋องน้ำอัดลม กระป๋องเบียร์ กระป๋องน้ำผลไม้ ชิ้นส่วนของเครื่องจักร อุปกรณ์เคมีและอื่น ๆ สารส้ม ($K_2SO_4Al_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$) ซึ่งเป็นสารประกอบของอะลูมิเนียมใช้ในกระบวนการทำ

น้ำประปา การทำกระดาษ การบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คุณสมบัติ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนและเบาที่มีลักษณะไม่เป็นเงา เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันชั้นบาง ๆ ที่เกิดขึ้นเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะอะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงประมาณ 49 ล้านปาสกาล (MPa) และ 400 MPa ถ้าทำเป็นโลหะผสม อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้าและทองแดง อ่อนสามารถดัดได้ง่าย 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) โลหะเงินทองคำและทองแดง สะท้อนแสงได้ดีกว่า อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ดัดได้ง่ายเป็นอันดับ 2 (รองจากทองคำ) และอ่อนเป็นอันดับที่ 6 อะลูมิเนียมสามารถนำความร้อนได้ดี จึงเหมาะสมที่จะทำหม้อหุงต้มอาหาร

2.5.5 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)



รูปที่ 2.14 สแตนเลส (Stainless Steel)

“สแตนเลส” หรือชื่ออย่างเป็นทางการ คือ “เหล็กกล้าไร้สนิม” เป็น ศัพท์ทั่วไปที่ใช้เรียกเหล็กในกลุ่มที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สแตนเลสเป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน ซึ่งส่วนประกอบจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ มีโครเมียม เป็นส่วนผสมหลัก ประมาณ 10.5 % เนื่องจากโลหะผสมดังกล่าวไม่เป็นสนิมที่มีสาเหตุจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง ออกซิเจนในอากาศกับโครเมียมในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม เกิดเป็นฟิล์มบางๆเคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมได้เป็นอย่างดี ปกป้องการกัดกร่อน และไม่ชำระหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป สำหรับในสหรัฐอเมริกาและในหลายประเทศ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการบินนิยมเรียกโลหะนี้ว่า corrosion resistant steel เมื่อไม่ได้ระบุชัดว่าเป็นโลหะผสมชนิดใด และคุณภาพระดับใด แต่ในท้องตลาดเราสามารถพบเห็น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 18-8 มากที่สุด ซึ่งเป็นการระบุถึง ธาตุที่เจือลงในเนื้อเหล็กคือ โครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ สแตนเลสประเภทนี้จัดเป็น Commercial Grade คือมีใช้ทั่วไปหาซื้อได้ง่าย มักใช้ทำเครื่องใช้ทั่วไป ซึ่งเราสามารถจำแนกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมได้จากเลขรหัสที่กำหนดขึ้นตามมาตรฐาน AISI เช่น 304 304L 316 316L เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมจะเป็นตัวกำหนดเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีความต้องการในการใช้งานไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ที่แตกต่างกันออกไป เหล็กกล้าไร้สนิมกับการเกิดสนิม ปกติ Stainless steel จะไม่เป็นสนิมเพราะที่ผิวของมันจะมีฟิล์มโครเมียมออกไซด์ บางๆเคลือบผิวอยู่อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Cr ใน Stainless steel กับ ออกซิเจนในอากาศ การทำให้ Stainless steel เป็นสนิมคือการถูกทำลายฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ที่เคลือบผิวออกไปในสภาวะที่ Stainless steel สามารถเกิดสนิมได้ ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้งเช่น ถ้าเหล็กกล้าไร้สนิมถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรายนั้นมีความชื้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็กก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้

การเลือกใช้วัสดุในการประกอบชิ้นงานสำหรับผู้ประกอบการ ผู้ออกแบบหรือโปรดักต์ดีไซน์ หรือแม้กระทั่งการนำวัสดุมาใช้ใน บ้าน ถือเป็นสิ่งสำคัญที่ทุกคนจะพิจารณาทั้งข้อดีและข้อเสียของวัสดุต่างๆ ลองมาพิจารณาดูกันว่าสแตนเลสคืออะไร

1) ทนทานต่อการกัดกร่อน สแตนเลสทุกตระกูลทนทานต่อการกัดกร่อน แต่จะแตกต่างกันไปตามส่วนผสมของโลหะ เช่น เกรดที่มีโลหะผสม ไม่สูง สามารถต้านทาน การกัดกร่อนในบรรยากาศทั่วไป ในขณะที่เกรดที่มีโลหะผสมสูงสามารถต้านทานการกัดกร่อน ในกรด ต่าง สารละลาย บรรยากาศคลอรีน ได้เกือบทั้งหมด

2) ความต้านทานต่ออุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ สแตนเลสบางเกรดสามารถทนความร้อนหรือ/และความเย็น รวมถึงการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลันได้ดี และด้วยคุณสมบัติพิเศษในการทนไฟ ทำให้มีการนำสแตนเลสไปใช้ในอุตสาหกรรมขนส่ง อุตสาหกรรม ปิโตรเคมี อย่างแพร่หลาย

3) ง่ายต่องานประกอบ หรือแปรรูป สแตนเลสส่วนใหญ่สามารถ ตัด เชื่อม ขึ้นรูป ตบแต่งทางกล ลากขึ้นรูป ขึ้นรูปนูนต่ำได้ง่าย ด้วยรูปร่าง สมบัติ และลักษณะต่างๆของสแตนเลสช่วยให้ ผู้ผลิตสามารถนำสแตนเลสไปประกอบกับวัสดุอื่นๆได้ง่าย

4) ความทนทาน คุณสมบัติเด่นอีกประการหนึ่งของสแตนเลสคือความแข็งแรงทนทาน สแตนเลสสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยการขึ้นรูปเย็น ซึ่งใช้เพื่อออกแบบงาน โดยลดความหนา น้ำหนักและราคา สแตนเลสบางเกรดอาจใช้ในงานที่ทนความร้อนและยังคงความ ทนทานสูง

5) ความสวยงาม ด้วยรูปทรงและพื้นผิวที่หลากหลายรูปแบบที่สวยงาม ทำความสะอาดได้ง่ายปัจจุบันสแตนเลสมีสีให้เลือกมากมายด้วย กรรมวิธีชุบเคลือบผิวด้วยเคมี ไฟฟ้าสามารถทำให้สแตนเลสมีผิวสีทอง บรอนซ์ เขียว เงิน และสีดำ ทำให้สามารถเลือก ประยุกต์ใช้สแตนเลสได้อย่างมากมาย นอกจากนี้ ความเงางามของ สแตนเลสในอ่างล้างจาน อุปกรณ์ประกอบอาหาร หรือ เฟอร์นิเจอร์ทำให้ บ้านดูสะอาดและน่าอยู่อีกด้วย

6) ความปลอดภัยและถูกสุขลักษณะ การทำความสะอาด การดูแลรักษาสแตนเลส และมีความเป็นกลางสูงจึงไม่ดูดซึมรสใดๆ เป็นเหตุผลสำคัญที่สแตนเลสถูกนำมาใช้งานในงานโรง พยาบาล เครื่องครัว ด้านโภชนาการและด้านเภสัชกรรม เนื่องจากความทนทาน ต้องการการดูแลรักษาน้อย และค่าใช้จ่ายต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการใช้งาน การใช้อุปกรณ์เครื่องครัวสแตนเลสในบ้านเรือนให้ความรู้สึกถึงความปลอดภัยแก่ผู้ใช้

7) ช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมสแตนเลสเป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ และกว่า ของวัสดุที่ใช้ในการผลิตมาจากเศษเหล็ก

เอกสารนี้เป็นสมบัติของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การนำความร้อน

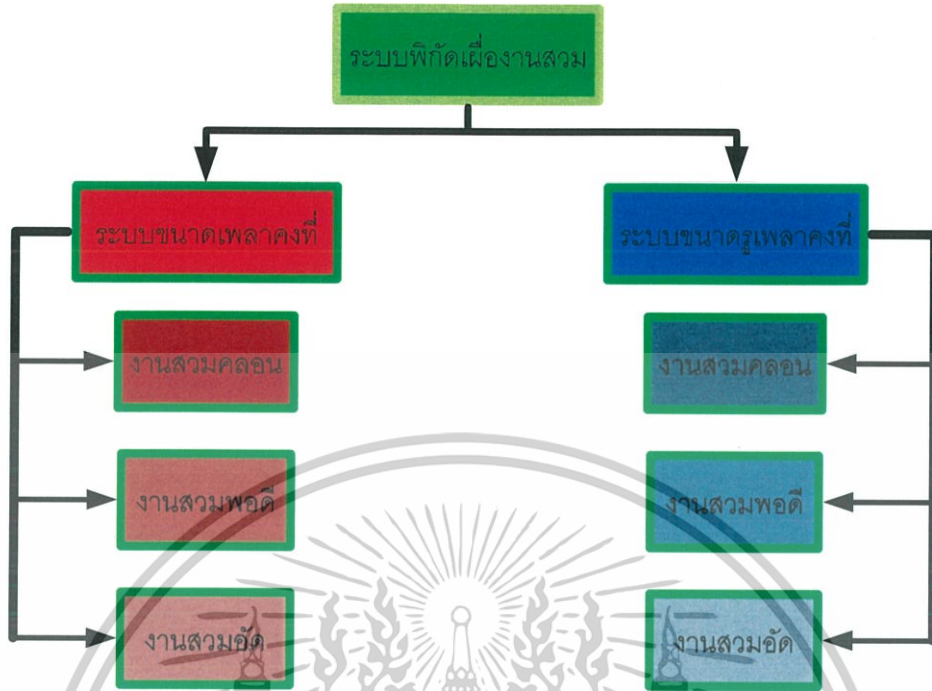
การนำความร้อนคือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค เป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อน ในโลหะ การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ(คล้ายการนำไฟฟ้า)ในของเหลวและของแข็งที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำเป็นผลมาจากการสั่นของโมเลกุลข้างเคียง ในก๊าซ การนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นสะท้อนระหว่างโมเลกุลหรือกล่าวคือการนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่าน โดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(k) สารนำความร้อนที่ใช้ในเครื่องยนต์คืออากาศ

ตาราง 2.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

วัสดุ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k)(W/mk)
อากาศ (ที่ความดันบรรยากาศ)	0.026
อะลูมิเนียม	237
ทองแดง	401
ทองเหลือง	100
เพชร	2300
กระดาษ	0.05
ไม้	0.1-0.35
เงิน	429
สแตนเลส	18

2.7 งานสวมอัด

จากความต้องการที่จะเชื่อมต่อชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกหรือเพลลา (Shaft) เข้ากับชิ้นงานที่มีรูหรือรูเพลลา(Hole) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพ ภายใต้ข้อจำกัดที่ว่าในการปฏิบัติงานสร้างชิ้นงานย่อมต้องเกิดค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นระบบพิกัดเผื่องานสวมขึ้นมาเพื่อเป็นหลักปฏิบัติในการกำหนดช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเพลลาหรือรูเพลลาที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของชิ้นงานลดลง โดยระบบพิกัดเผื่องานสวมที่ใช้ในการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงานสามารถแบ่งเป็น 2 ระบบ คือระบบขนาดเพลลาคงที่ และระบบขนาดรูเพลลาคงที่ ซึ่งระบบงานสวมดังกล่าวยังสามารถสามารถจำแนกการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงานออกสาร 3 ลักษณะได้ 3 ลักษณะ ดังนี้ งานสวมอัด งานสวมพอดี และงานสวมคองครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงชนิดของระบบพิกัดเผื่องานสวม

2.7.1 คัพพีเฉพาะในระบบพิกัดเผื่อในงานสวม

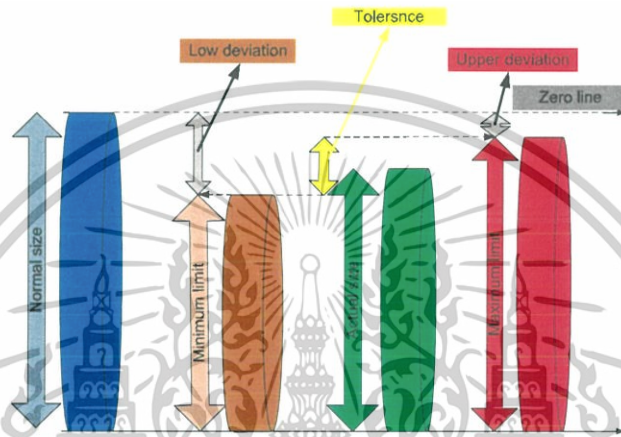
ตารางที่ 2.2 แสดงคัพพีเฉพาะในระบบพิกัดเผื่อในงานสวม

คำศัพท์	ความหมาย
Zero line	เส้นอ้างอิงที่ใช้ในการระบุขนาดของชิ้นงาน
Normal size	ค่าขนาดของชิ้นงานที่ระบุลงในการเขียนแบบ หรือคือค่าขนาดในอุดมคติ
Upper deviation	ค่าที่ใช้ระบุขนาดโตที่สุดของชิ้นงานที่ยอมรับได้ในงานสวม
Maximum limit	ค่าขนาดของชิ้นงานโตสุดที่ยอมรับได้ในงานสวม
Lower deviation	ค่าที่ใช้ระบุขนาดเล็กที่สุดของชิ้นงานที่ยอมรับได้ในงานสวม
Minimum limit	ค่าขนาดของชิ้นงานเล็กสุดที่ยอมรับในงานสวม
Tolerance	ค่าช่วงความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงานที่ไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของชิ้นงานลดลง โดยค่าช่วงดังกล่าวจะมีความกว้างระหว่างค่า Maximum limit กับค่า Minimum limit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงศัพท์เฉพาะในระบบพิกัดเผื่อในงานสวม (ต่อ)

Actual size	ขนาดจริงของชิ้นงานที่มีการสร้างขึ้นหรือคือค่าขนาดในทางปฏิบัติ โดยขนาดดังกล่าวต้องมีค่าอยู่ในช่วง Tolerance จึงจะได้รับการยอมรับให้สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของชิ้นงานลดลง
-------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

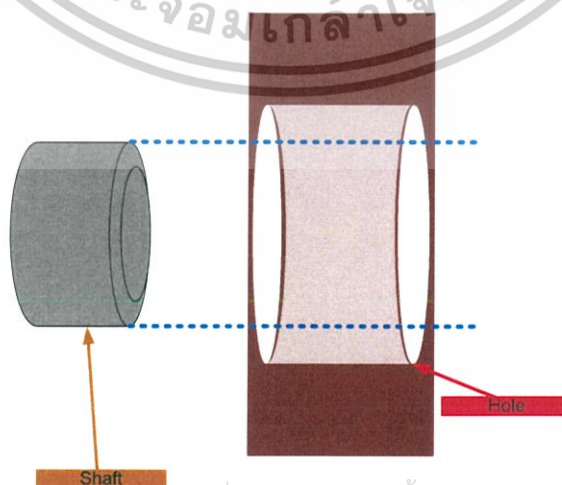


รูปที่ 2.16 แสดงความหมายของคำศัพท์เฉพาะในระบบพิกัดเผื่อในงานสวม

2.7.2 ชนิดของงานสวม

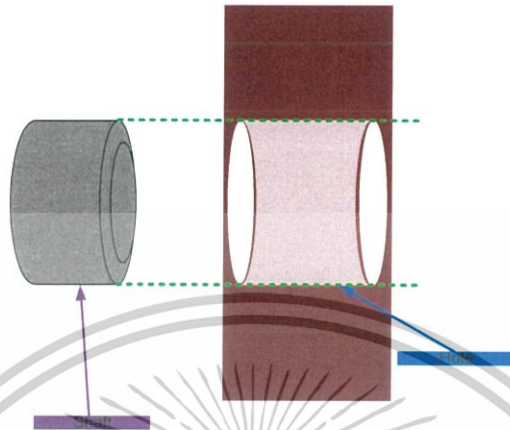
งานสวมสามารถแบ่งลักษณะตามการใช้งานออกได้เป็น 3 ชนิดดังนี้

1. งานสวมคลื่อน (Clearance fit) คืองานสวมที่มีลักษณะการใช้ขนาดของเพลลาที่เล็กกว่าขนาดของรูเพลลาจึงส่งผลให้เพลลาที่สวมในลักษณะดังกล่าวสามารถหมุน และเลื่อนที่โยกคลอนภายในรูเพลลาได้เล็กน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใช้รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะงานสวมคลื่อนของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. งานสวมพอดี (Transition fit) คืองานสวมที่มีลักษณะการใช้ขนาดของเพลาคือใกล้เคียงกับขนาดของรูเพลามากจึงส่งผลให้เพลาสวมในลักษณะดังกล่าวสามารถหมุนได้



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะงานสวมพอดี

3. งานสวมอัด (Interference fit) คืองานสวมที่มีลักษณะการใช้ขนาดของเพลาคือโตกว่าขนาดของรูเพลามากจึงส่งผลให้เพลากันไม่สามารถหมุนในรูเพลาคือได้

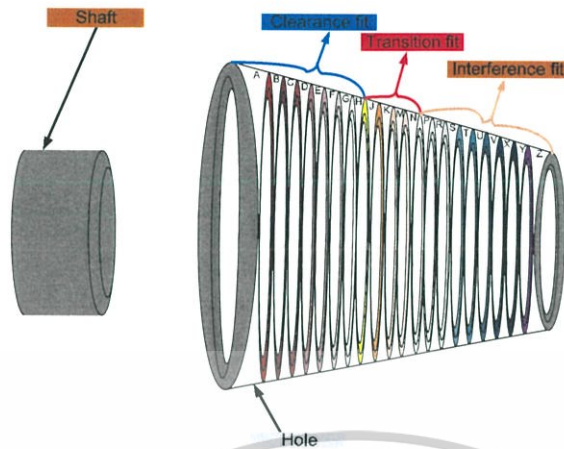


รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะงานสวมอัด

2.7.3 ระบบการพิจารณาพิคัดเผื่อในงานสวม

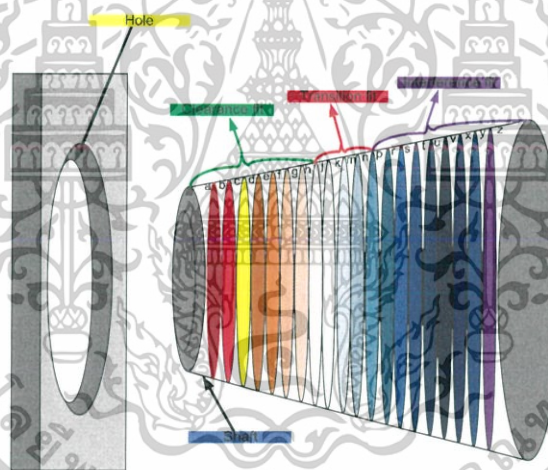
1. ระบบขนาดเพลาคงที่ คือระบบที่กำหนดให้ขนาดของเพลาคือที่ใช้งานมีขนาดคงที่แต่พิจารณาหาค่าขนาดของรูเพลาคือที่เหมาะสมกับการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะระบบที่กัดเผื่อแบบเพลาคงที่

2. ระบบขนาดรูเพลาคงที่ คือระบบที่กำหนดให้ขนาดของรูเพลาคงที่ใช้งานมีขนาดคงที่แต่พิจารณาหาค่าขนาดของเพลาคงที่เหมาะสมกับการใช้งาน



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะระบบที่กัดเผื่อแบบรูเพลาคงที่

2.8 การวิเคราะห์เครื่องยนต์จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

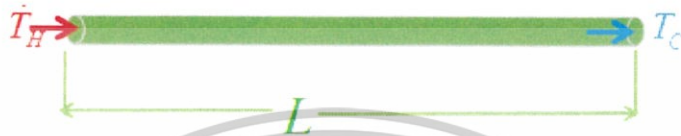
โปรแกรม Solidworks จะมีฟังก์ชัน Simulation และ Flow simulation เป็นแบบจำลองคอมพิวเตอร์การช่วยการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ช่วยให้คุณสามารถทดสอบเสมือนจริงได้ และสามารถกำหนดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับแบบจำลอง Simulation และ Flow simulation จึงเป็นทางเลือกที่ทำให้แน่ใจว่าผลิตภัณฑ์ของคุณทำงานได้จริง เข้าใจพฤติกรรมของผลิตภัณฑ์ของคุณว่ามีพฤติกรรมอย่างไรในการทำงานจริง ระยะเวลาในการทดสอบ และการสร้างผลิตภัณฑ์ ทำให้การแก้ปัญหาทางวิศวกรรมทำได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น

2.8.1 การประเมินประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรการทำงานด้วยการวิเคราะห์การเคลื่อนไหว (Motion analysis) คือ การวิเคราะห์การเคลื่อนไหว โดยกำหนดการเคลื่อนไหว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิงกับเวลา สำหรับปัญหาทางจลน์ศาสตร์ และปัญหาทางไดนามิก ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งระบบ หรือแยกแบบจำลองวิเคราะห์เพียงบางส่วนก็ได้

2.8.2 หลักการหาค่าการส่งผ่านความร้อนที่มีความไม่คงที่ภายในของแข็ง คือ เป็นหลักการที่ใช้ในการจำลองการไหลของความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงกับทั้งค่าระยะทางและเวลา ซึ่งหลักการดังกล่าวมีความสำคัญในการจำลองการส่งผ่านความร้อนให้เกิดผลการทดลองที่มีความใกล้เคียงค่าความเป็นจริงมากยิ่งขึ้นดังรูปที่ 2.22 และมีรูปแบบสมการ 1a



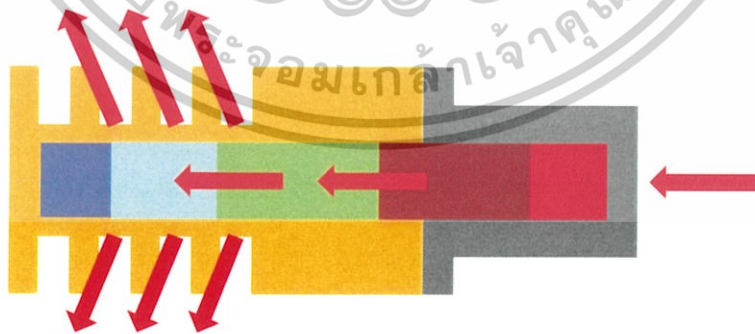
รูปที่ 2.22 แสดงการไหลของความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงกับทั้งความยาวและเวลา

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial \tau} \tag{1a}$$

ซึ่งสามารถแก้สมการต้นที่ เพื่อสร้างสมการรูปทั่วไปซึ่งใช้อ้างอิงในการจำลองการทดลองเป็นดังสมการที่ 2a

$$T = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-(n\pi/L)^2 k\tau/\rho c} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \tag{2a}$$

2.8.3 หลักการส่งผ่านความร้อนผ่านผิวของกระบอกสูบจากภายในออกสู่ภายนอก คือ หลักการที่ใช้ในการจำลองการไหลของความร้อนซึ่งมีลักษณะการไหลที่นอกจากการไหลในกระบอกสูบแล้วยังมีความร้อนบางส่วนที่มีการไหลผ่านผิวภายในของกระบอกสูบออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และหลักการนั้นยังสามารถใช้ในการอธิบายการไหลของความร้อนจากแหล่งความร้อนผ่าน Heater ก่อนจะไหลเข้าสู่กระบอกสูบ ดังรูปที่ 2.23



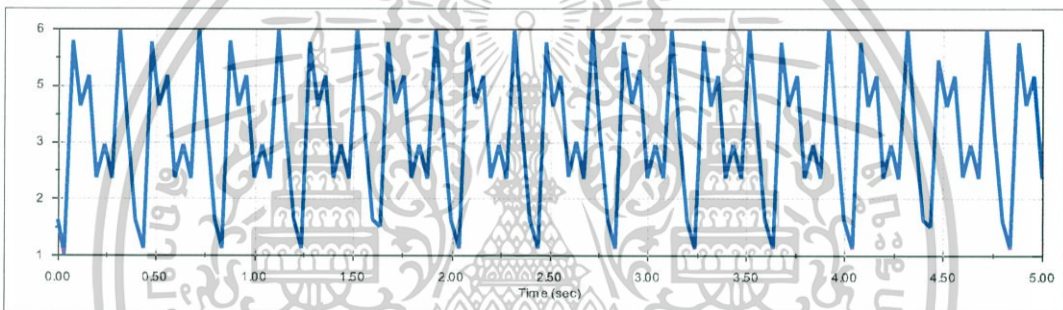
รูปที่ 2.23 แสดงการไหลของความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อน

จากรูปที่ 2.23 แสดงการไหลของความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนผ่านผิวของ Heater เข้าสู่อากาศภายในกระบอกสูบและการไหลของความร้อนจากอากาศภายในกระบอกสูบผ่านผิวของกระบอกสูบสู่สภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งเป็นปัจจัยที่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาเพื่อการจำลองการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

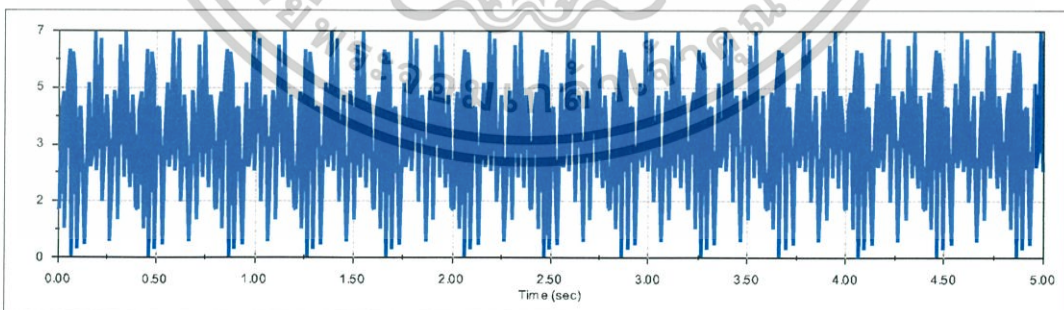
ทดลองได้ผลที่มีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น โดยสมการพื้นฐานที่ใช้อ้างอิงในการจำลองการทดลองเป็นดังสมการที่ 3a

$$T(r,z) = T_{(r=0,z=z_{inlet})} - \frac{q_w R_i}{k} \left[\left(\frac{r}{R_i} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{r}{R_i} \right)^4 \right] + \frac{4q_w (z - z_{inlet})}{\rho C_p u_{max} R_i} \quad (3a)$$

2.8.4 หลักการเลือกอัตราการแสดงผลค่าทอร์คเทียบกับเวลา คือ เป็นปัจจัยที่กำหนดลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์คกับเวลาว่าจะมีความต่อเนื่องกันของค่าทอร์คแต่ละช่วงเวลาอย่างไร โดยหากมีการเลือกค่าอัตราการแสดงผลที่ต่ำเกินไปจะส่งผลให้กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่ต่อเนื่อง แต่หากเลือกทำการเลือกอัตราการแสดงผลค่าทอร์คได้พอดีจะส่งผลให้กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นกราฟที่มีความต่อเนื่องกันที่ค่าเวลาต่างๆ แต่ก็ต้องแลกมาด้วยการใช้เวลาในการจำลองการทดลองที่นานยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.24 แสดงการเลือกอัตราการแสดงผลต่ำ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์คกับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงกันแบบไม่ต่อเนื่อง

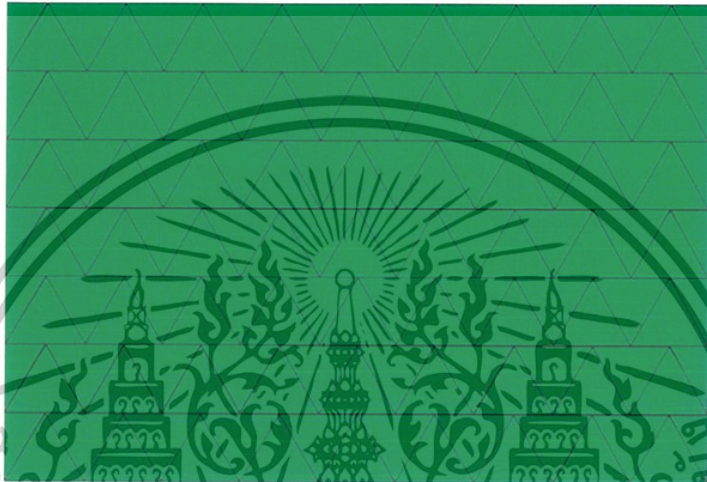


รูปที่ 2.25 แสดงการเลือกอัตราการแสดงผลสูง ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์คกับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงกันแบบต่อเนื่อง

2.8.5 ทฤษฎีการเลือกความละเอียดของพื้นที่โดยการกำหนดขนาดของ mash

เป็นทฤษฎีที่จะทำการแบ่งพื้นที่ผิวของระบบที่สนใจจะวัดค่าปริมาณทางฟิสิกส์ออกเป็น mash ย่อยโดยจะพิจารณาให้ทุกตำแหน่งในหนึ่ง mash ได้รับค่าปริมาณทางฟิสิกส์ที่สนใจเท่ากัน

โดยหากสามารถแบ่งจำนวน mash ได้มากโปรแกรมก็สามารถที่จะจำลองผลของปริมาณทางฟิสิกส์ที่มีผลมากระทำได้ระบบได้ค่าที่มีความใกล้เคียงค่าความเป็นจริงมากขึ้นหรืออาจสามารถสรุปได้ว่าค่าความละเอียดของระบบการจำลองการทดลองนั้นแปรผันตรงกับจำนวน mash แต่การแบ่งพื้นที่ออกเป็น mash ย่อยๆจำนวนมากก็ยังคงมีข้อเสียที่ว่าจะเป็นการเพิ่มภาระในการวิเคราะห์ให้กับโปรแกรมจึงส่งผลให้ในการจำลองการทดลองใช้เวลาที่นานกว่าการวิเคราะห์ระบบที่มีจำนวน mash น้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.26 และรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 แสดงการแบ่งพื้นที่ผิวของระบบออกเป็น mash ย่อยๆ จำนวนมาก



รูปที่ 2.27 แสดงการแบ่งพื้นที่ผิวของระบบออกเป็น mash ย่อยจำนวนไม่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

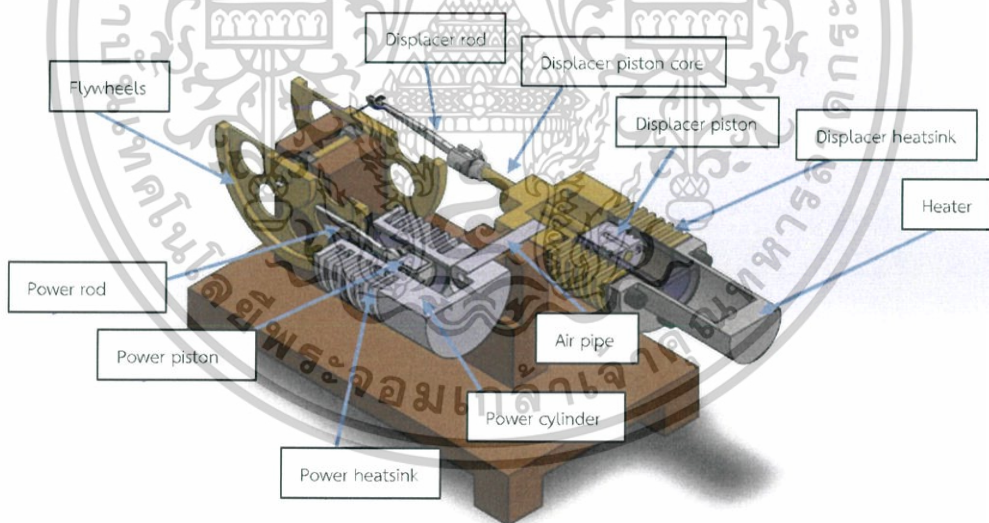
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานวิจัยในการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา อาทิเช่น ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยนต์ และหลักการทำงานของเครื่องยนต์ เป็นต้น
- ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาด้วยโปรแกรม SolidWorks
- ขั้นตอนที่ 3 การสร้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่ได้ออกแบบขึ้น
- ขั้นตอนที่ 4 การจำลองการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรม Solidworks
- ขั้นตอนที่ 5 ทดสอบและวิเคราะห์ที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น

3.1 การศึกษาส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมาจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาต้นแบบ



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

จากการศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา เครื่องต้นแบบ พบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีส่วนประกอบหลักๆดังนี้

ด้านร้อน : ด้านร้อนจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. Heater เป็นส่วนรับความร้อนจากภายนอก โดยวัสดุทำจากสแตนเลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2. Displacer heatsink วัสดุทำจากทองเหลือง ช่วยระบายความร้อนออกจากกระบอกสูบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Displacer cylinder หรือ ครอบสูบดีสเพลสเซอร์ วัสดุทำจากทองเหลือง
4. Displacer piston ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นและลงภายในครอบสูบ รับแรงกด และส่งกำลังไปสู่เพลลาข้อเหวี่ยงโดยผ่านก้านสูบ ลูกสูบนั้นยังได้รับความร้อน และอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่กระทำอยู่ตลอดเวลาและจะต้องสามารถทนต่อการทำงานที่รอบสูงเป็นเวลานานๆได้ ลูกสูบโดยปกติ ทำมาจากโลหะผสมอลูมิเนียม ซึ่งมีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้

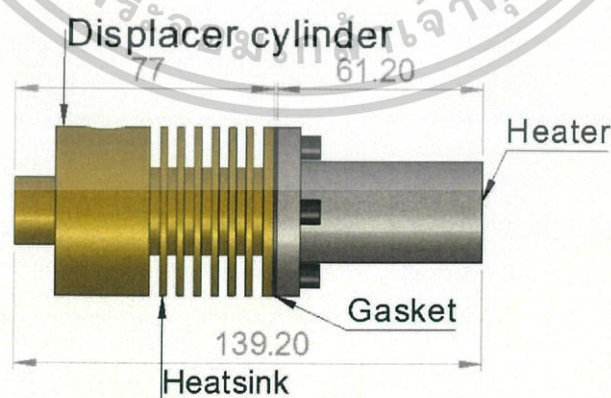
ด้านเย็น : ด้านเย็นจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. Power heatsink โดยวัสดุทำจากอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้ดี
2. Power cylinder หรือ ครอบสูบกำลัง ทำจากอลูมิเนียม
3. Power piston หรือ ลูกสูบกำลัง

ส่วนประกอบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

1. Displacer piston core หรือก้านสูบ ก้านสูบทำหน้าที่ต่อลูกสูบกับเพลลาข้อเหวี่ยง และถ่ายทอดกำลังไปสู่เพลลาข้อเหวี่ยง
2. Displacer rod หรือข้อเหวี่ยงดีสเพลสเซอร์ จะต่ออยู่กับก้านสูบ ทำหน้าที่เป็นส่วนสำคัญในการส่งถ่ายแรงจากการบีบอัดและขยายตัวของอากาศในครอบสูบดีสเพลสเซอร์ไปยังล้อตุนกำลัง
3. Air pipe หรือท่ออากาศ โดยการบีบอัดนี้จะทำให้เกิดความดันไหลผ่านท่ออากาศนี้
4. Power rod หรือลูกสูบกำลัง ทำหน้าที่รับแรงที่ส่งมาจากด้านร้อน โดยลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ส่งถ่ายแรงให้กับข้อเหวี่ยงกำลัง
5. flywheels หรือล้อตุนกำลัง จะถูกกระตุ้นจาก Power rod และ Displacer rod ให้หมุนอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์

3.1.1 ส่วนประกอบด้านร้อน



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบด้านร้อน

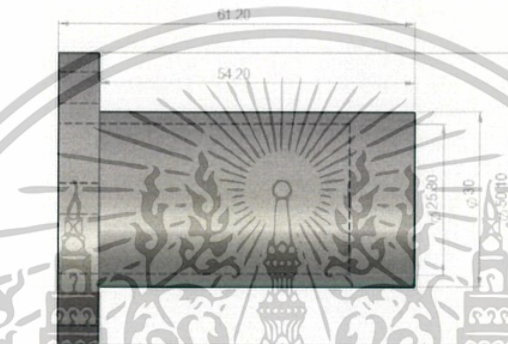
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 คือส่วนประกอบด้านร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา ซึ่งประกอบด้วย ฮีตเตอร์ (Heater) ครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer cylinder) ฮีตซิงค์ (Heatsink) และปะเก็น (Gasket) ทั้งนี้ภายในครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer cylinder) ยังประกอบไปด้วยลูกสูบและท่อแก๊ว อีกด้วย

ความยาวด้านร้อนทั้งหมด

$$l_{Cy,t} : 139.20\text{mm}$$

ฮีตเตอร์ (Heater) เป็นส่วนที่รับความร้อนจากภายนอก เพื่อให้ทำให้อากาศในครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer cylinder) ขยายตัว



รูปที่ 3.3 ฮีตเตอร์ (Heater)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกฮีตเตอร์ (Heater)

$$d_{out,ht} : 30\text{mm}$$

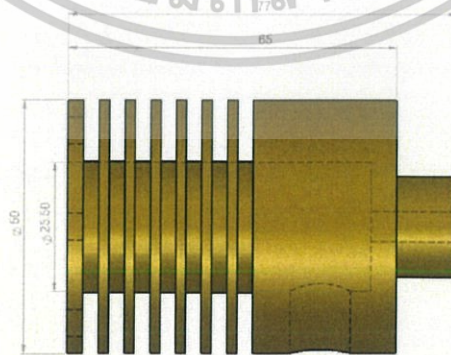
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในฮีตเตอร์ (Heater)

$$d_{in,ht} : 25.80\text{mm}$$

ความยาวฮีตเตอร์ (Heater)

$$l_{ht} : 61.20\text{mm}$$

ครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer cylinder)



รูปที่ 3.4 ครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer cylinder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์

$$d_{Cy,d} : 25\text{mm}$$

ความยาวกระบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์

$$l_{Cy,d} : 77\text{mm}$$

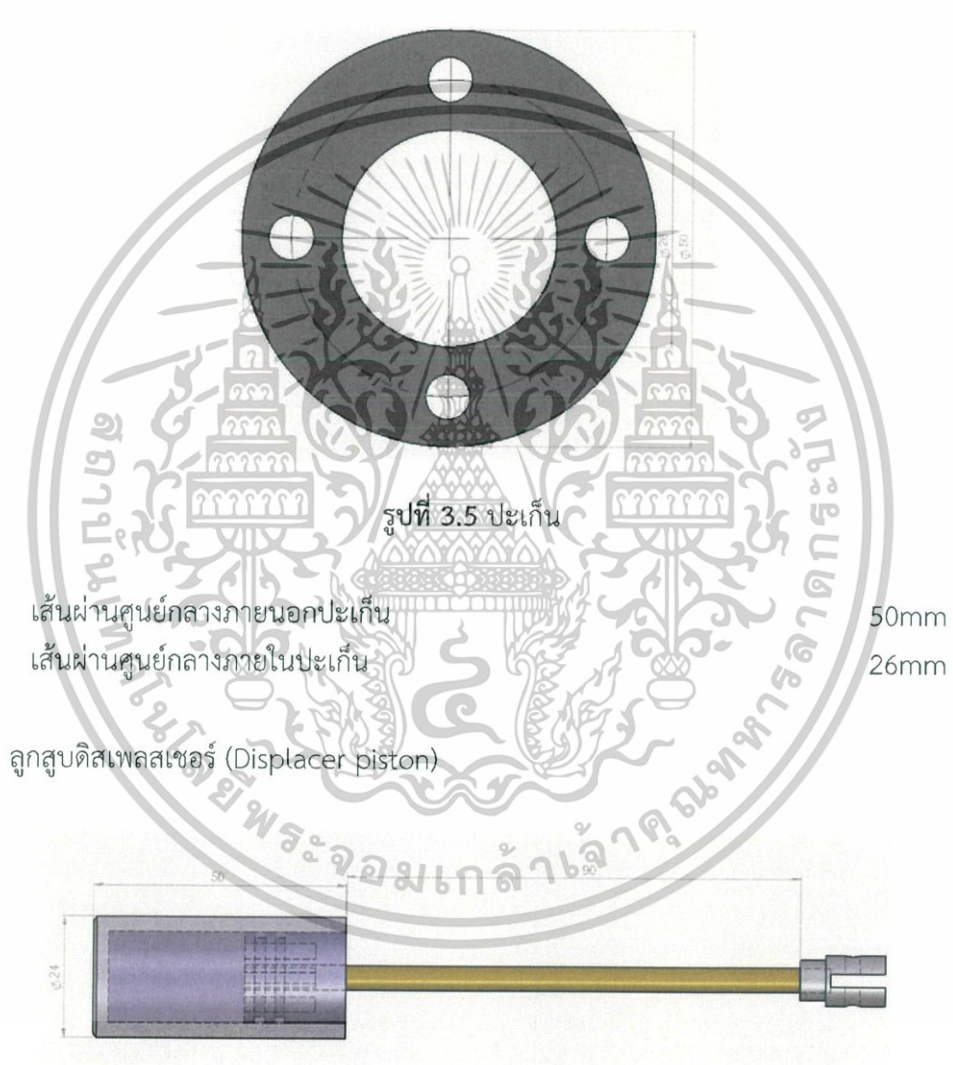
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกฮีตซิงค์

$$d_{out,hs} : 50\text{mm}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในฮีตซิงค์

$$d_{in,hs} : 25.50\text{mm}$$

ปะเก็น สำหรับกันรั้ว



รูปที่ 3.6 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ และแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์

เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบดิสเพลสเซอร์

$$d_d = 24\text{mm}$$

พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์

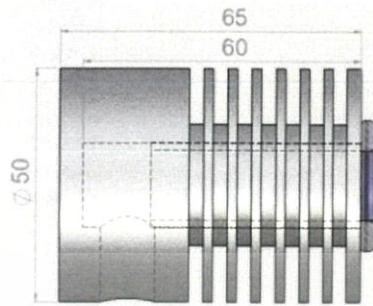
$$A_d = \pi \left(\frac{d_d}{2} \right)^2 = 452.48(\text{mm})^2$$

ความยาวของแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์

$$l_{core,d} = 90\text{mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับควรใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ส่วนประกอบด้านเย็น



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบด้านเย็น



รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบภายในด้านเย็น

จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 คือส่วนประกอบด้านเย็นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ประกอบด้วย กระจกบอกลูกสูบกำลัง (Power cylinder) ซึ่งภายในกระจกบอกลูกสูบกำลังจะมีลูกสูบ และกระจกบอกลูกสูบอยู่ภายใน ความยาวด้านเย็นทั้งหมด ปริมาตรภายในกระจกบอกลูกสูบกำลัง

$$l_{Cy,p} = 65\text{mm}$$

$$V_{Cy,p} = A_p l_{Cy,p} =$$

กระจกบอกลูกสูบกำลัง (Power cylinder)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในกระจกบอกลูกสูบกำลัง

$$d_{Cy,p} = 18\text{mm}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางฮีตซิงค์

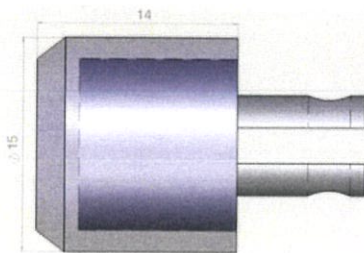
$$d_{out,hs} = 50\text{mm}$$

ความยาวกระจกบอกลูกสูบกำลัง

$$l_{Cy,p} = 60\text{mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกสูบกำลัง (Power piston)



รูปที่ 3.9 ลูกสูบกำลัง

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลูกสูบกำลัง

$$d_d = 15\text{mm}$$

ความยาวของลูกสูบกำลัง

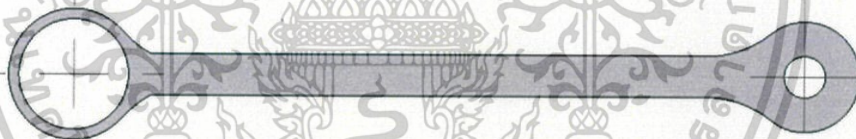
$$l_d = 14\text{mm}$$

พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบกำลัง

$$A_d = \pi \left(\frac{d_d}{2} \right)^2 = 176.714 \text{ (mm)}^2$$

3.1.3 ข้อเหวี่ยง

ข้อเหวี่ยงสำหรับฝั่งดิสเพลสเซอร์



รูปที่ 3.10 ข้อเหวี่ยงสำหรับฝั่งดิสเพลสเซอร์

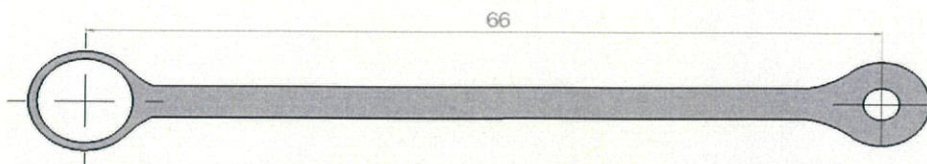
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรูข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์

$$d_{rod,d} = 3\text{mm}$$

ระยะระหว่างรูข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์

$$l_{rod,d} = 53\text{mm}$$

ข้อเหวี่ยงสำหรับฝั่งกำลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

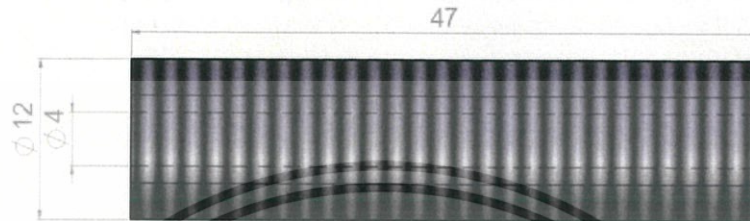
รูปที่ 3.11 ข้อเหวี่ยงสำหรับฝั่งกำลัง

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูข้อเหวี่ยงกำลัง
ระยะระหว่างรูข้อเหวี่ยงกำลัง

$$d_{rod,p} = 3\text{mm}$$

$$l_{rod,p} = 66\text{mm}$$

3.1.4 ท่ออากาศ



รูปที่ 3.12 ท่ออากาศ

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่ออากาศ

$$d_{out,tube} = 12\text{mm}$$

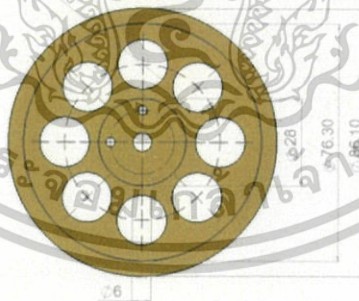
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่ออากาศ

$$d_{in,tube} = 4\text{mm}$$

ความยาวของท่ออากาศ

$$l_{tube} = 47\text{mm}$$

3.1.5 ล้อตุนกำลัง



รูปที่ 3.13 ล้อตุนกำลัง

เส้นผ่านศูนย์กลางล้อกระตุ้นกำลัง

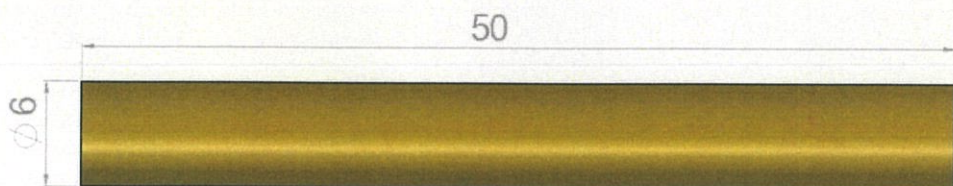
$$d_{wheel} = 86.10\text{ mm}$$

ความหนาล้อกระตุ้นกำลัง

$$l_{wheel} = 4.6\text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 เพลลา



รูปที่ 3.14 เพลลา

ความยาวของเพลลา

50 mm

เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา

6 mm

3.1.7 ตลับลูกปืน



รูปที่ 3.15 ตลับลูกปืน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู

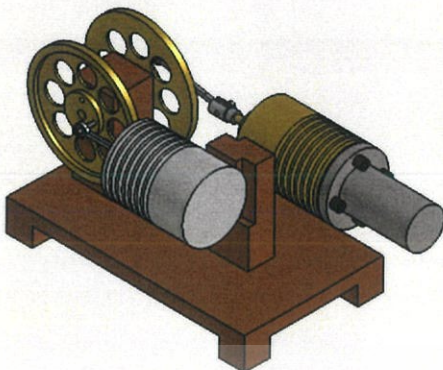
6 mm

ความหนา

5 mm

เมื่อประกอบชิ้นงานทุกส่วนที่ออกแบบ ด้วยขั้นตอนการ Assembly ของโปรแกรม Solidworks เพื่อสร้างชิ้นงานสามมิติ จะได้ดังรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา

3.2 การเพิ่มความสมดุลของล้อตุ้มกำลัง

การเพิ่มความสมดุลของล้อตุ้มกำลัง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ดีขึ้น ส่งผลให้เครื่องยนต์มีสมรรถนะที่สูงขึ้น ทั้งด้านกำลัง เวลาในการทำงาน เป็นต้น

หลักการสวมอัดถูกนำมาใช้สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพความสมดุลของล้อตุ้มกำลัง โดยจะใช้หลักการสวมอัด ในการสวมระหว่างเพลาล้อตุ้มกำลัง กับแบบริ่ง เพื่อเพิ่มความสมดุล ส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะทางกลศาสตร์ที่ดีขึ้น

ในระบบล้อกระตุ้นกำลังประกอบด้วย ล้อกระตุ้นกำลัง ตลับลูกปืน และเพลาลูกเข้าด้วยกัน โดยที่หลักการสวมอัดจะช่วยให้ล้อกระตุ้นกำลังมีความสมดุลมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.17 แสดงการเชื่อมต่อตลับลูกปืนเข้ากับเพลาลูกเข้าด้วยหลักการสวมอัด

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้ได้มีการใช้ระบบพิกัดเผื่องานสวมในคำนวณหาค่าขนาดที่เหมาะสมในการเชื่อมต่อระบบล้อกระตุ้นกำลัง ซึ่งระบบพิกัดเผื่องานสวมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการยึดระบบล้อกระตุ้นกำลังให้ทำงานได้อย่างสมดุลบนส่วนฐานและลดผลกระทบของการขยายตัวเชิงอุณหภูมิของเพลาลูกเข้าซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงลดลง โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้ระบบพิกัดเผื่องานสวมชนิด รูดซี่ และ เป็นระบบงานสวมชนิดสวมอัด โดยการอ้างอิงจากรางงานสวมชนิดรูดซี่ที่ ในการสวมอัดชิ้นงานเพลาลูกเข้าขนาด 6 mm ต้องใช้ชิ้นงานเพลาลูกเข้าที่มีขนาดความเผื่อ 6.015 mm ถึง 6.021 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา

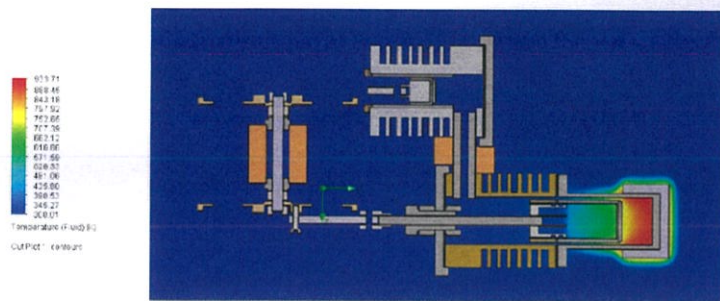
การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา ใช้โปรแกรม SolidWork 2015 ในการออกแบบทั้งหมด ทั้งนี้ SolidWorks คือโปรแกรม แกรมออกแบบงาน 3D หรือ 2D ที่ถูกใช้จริงในงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมสมาร์ทโฟน รถยนต์ รถจักรยานยนต์ อุปกรณ์เวชภัณฑ์ทางการแพทย์ หรืออุตสาหกรรมขนาดใหญ่อื่นๆ แน่ใจว่าลูกค้าย่อมต้องการทั้งลูกเล่นในการใช้งานที่น่าสนใจ และรูปลักษณ์ที่น่าใช้งาน ซึ่ง SolidWork สามารถช่วยผู้ออกแบบได้ดียิ่งขึ้นในการถ่ายทอดความคิดสร้างสรรค์ ตั้งแต่แบบร่างสเก็ตซ์งานและภาพร่าง มาเป็นแบบโมเดล 3D ได้อย่างรวดเร็ว

ขณะเดียวกันก็มีการ SolidWork Simulation คือ ซอฟต์แวร์ ที่ช่วยในการวิเคราะห์ความแข็งแรงทางวิศวกรรมของชิ้นงาน (Part or Assembly) ของเครื่องจักร หรือ ผลิตภัณฑ์ ที่ถูกออกแบบมาด้วย 3D CAD เพื่อช่วยในการประเมินคุณภาพของชิ้นงาน ช่วยปรับปรุงคุณภาพชิ้นงาน และสร้างนวัตกรรมได้ ซึ่งในชุดของ SOLIDWORKS Simulation นี้ คุณสามารถกำหนดสถานะต่างๆ และแรงกระทำต่างๆ ในการทดสอบชิ้นงาน จึงทำให้ประเมินคุณภาพสินค้าก่อนการผลิตจริงได้ โดยสามารถกำหนดค่าสถานะต่างๆ ที่ต้องการทดสอบได้ตั้งแต่กระบวนการออกแบบ จึงทำให้ทราบถึงข้อผิดพลาดของแบบ ก่อนการนำมาผลิตจริงได้ จึงช่วยให้ท่านผลิตภัณฑ์ของท่าน มีคุณภาพ และสามารถต้นทุนในการผลิตได้ ซึ่งเราจะนำ SolidWork Simulation มาช่วยในการวิเคราะห์ทางแมคคา นิค ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



รูปที่ 3.18 โปรแกรม SolidWork 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างการ Simulation ของโปรแกรม SolidWork

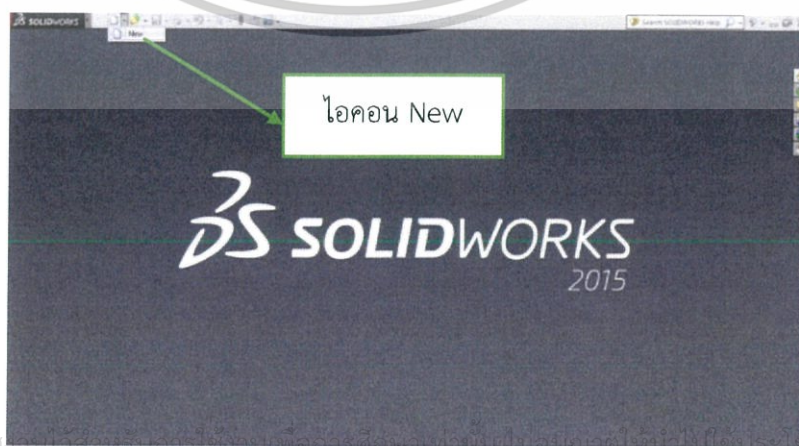
3.3.1 การเริ่มใช้งานโปรแกรม SolidWork พื้นฐาน

- เมื่อเปิดโปรแกรม SolidWork 2015 ขึ้นมา จะพบหน้าต่างโปรแกรมแบบนี้






รูปที่ 3.20 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015

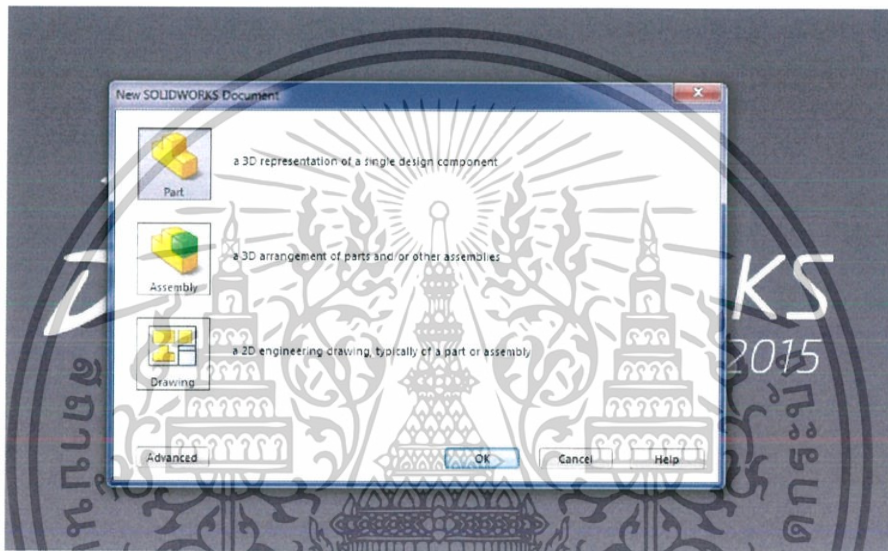
- เลือกแท็บด้านบน  และเลือก New เพื่อสร้างชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 3.21 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (2) เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากนั้นหน้าต่างโปรแกรม จะปรากฏให้เลือกการทำงานที่เราต้องการ

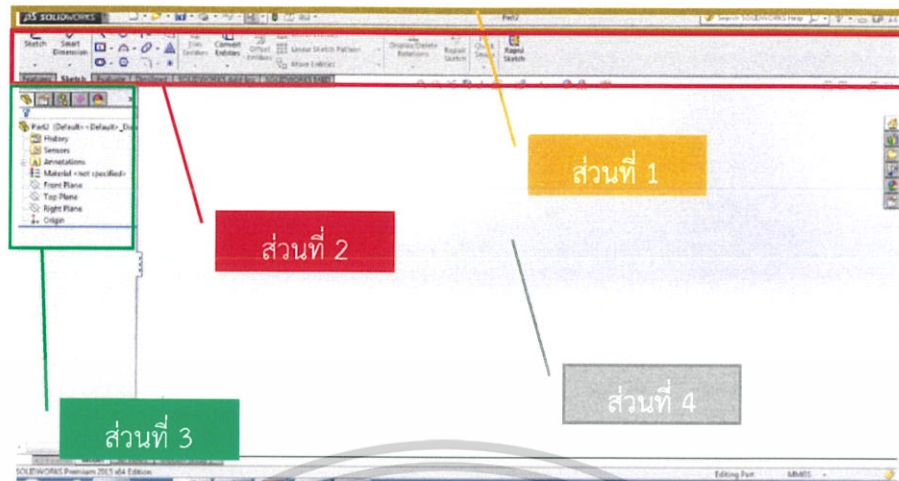
1.  Part การสร้างชิ้น 3D
2.  Assembly การนำชิ้นงานส่วนของ Part มาประกอบกัน
3.  Drawing การสร้างชิ้นงาน 2D



รูปที่ 3.22 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (3)

- เมื่อเราต้องการสร้างชิ้นงาน เลือก Part จะปรากฏหน้าต่างการทำงาน และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สร้างชิ้นงานดังรูป
 - ส่วนที่ 1 เป็นส่วนคำสั่งหลักของโปรแกรม
 - ส่วนที่ 2 เป็นส่วนคำสั่งเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้สำหรับสร้างงาน
 - ส่วนที่ 3 เป็นส่วนแสดงรายละเอียดต่าง และลำดับการสร้างชิ้นงาน เพื่อแก้ไข และติดตามชิ้นงาน
 - ส่วนที่ 4 เป็นส่วนของพื้นที่ที่แสดงงานที่สร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (4)

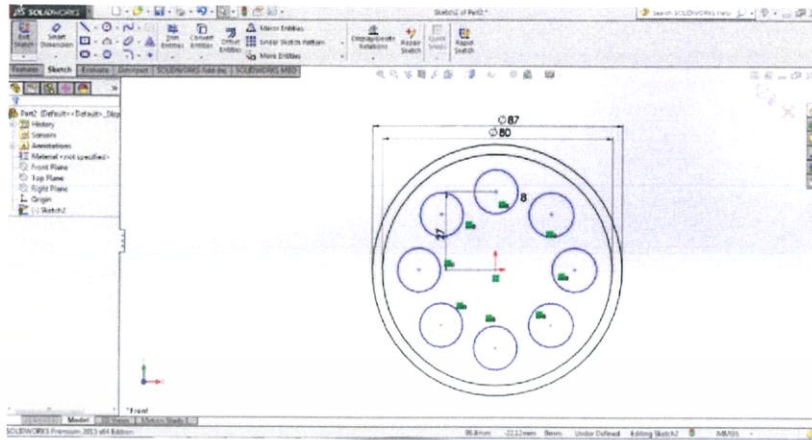
- ก่อนจะสร้างชิ้นงาน เราจำเป็นต้องเลือกกระดานชิ้นงานก่อน



รูปที่ 3.24 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (5)

- เมื่อเลือกกระดานที่เหมาะสมกับชิ้นงาน ก็จะสามารถสร้างชิ้นงานได้ตามต้องการ โดยเลือกใช้อุปกรณ์ได้จากแถบเครื่องมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (6)

3.3.2 การใช้โปรแกรม SolidWorks ในการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

นอกจากจะถูกใช้ในการออกแบบชิ้นงานสามมิติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแล้ว โปรแกรม SolidWorks ยังมีคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญนั่นคือ การวิเคราะห์ทางด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้าน กลศาสตร์ เทอร์โมไดนามิกส์ และการไหลของของไหล ซึ่งในโครงการพิเศษเล่มนี้จะทำการวิเคราะห์ เครื่องยนต์ ในเรื่อง

- 1) การไหลของของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์ เพื่อดูประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์
- 2) กลศาสตร์ เพื่อแรงบิดของเครื่องยนต์ (Torque)

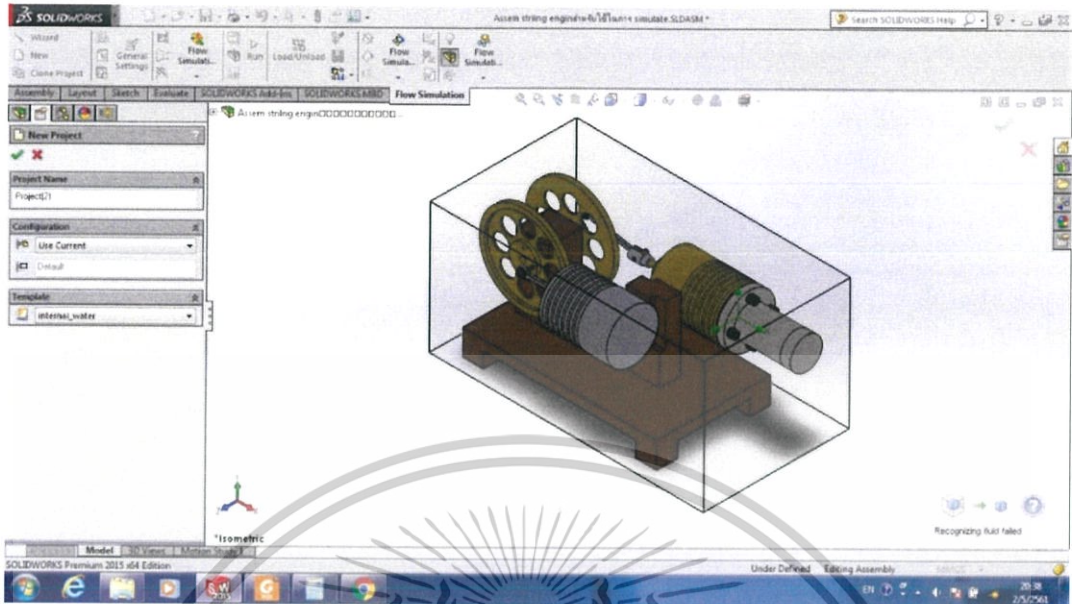
โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ดังนี้

- ใช้ฟังก์ชัน Flow Simulation เพื่อวิเคราะห์การไหลของของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์ เพื่อดูประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์

ในการวิเคราะห์ของไหลทำงานในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นจะทำการวิเคราะห์เพื่อนดู อุณหภูมิของของไหลทำงานภายในกระบอกสูบ รวมทั้งลักษณะทิศทางการไหล รวมทั้งอุณหภูมิของ โลหะที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยมีวิธีการตั้งค่าโปรแกรมดังนี้

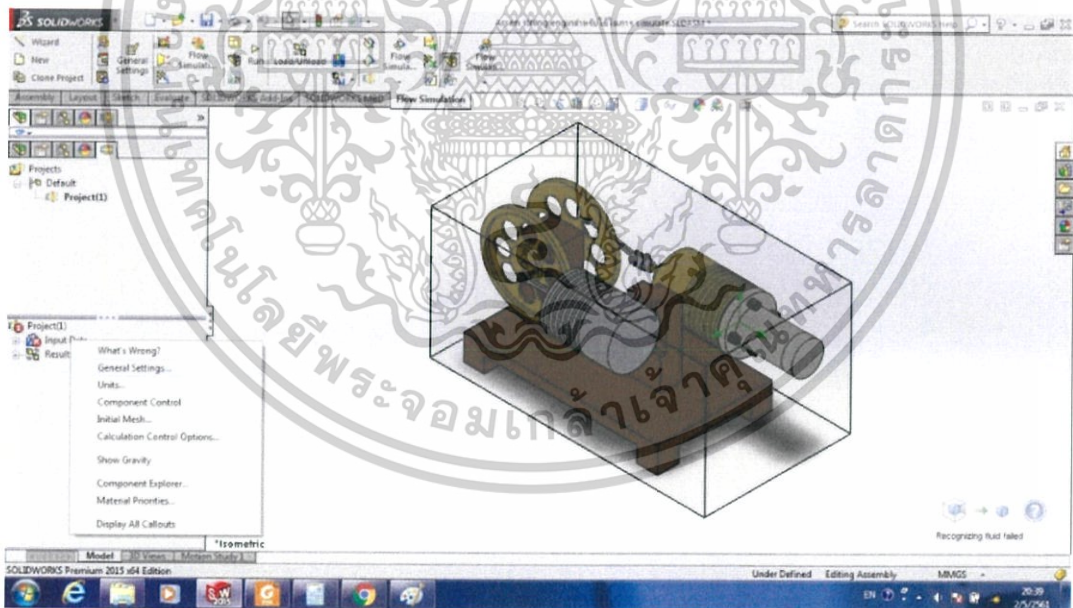
1. คลิกไปที่ “Flow Simulation” จากนั้นคลิก “New” เพื่อสร้างไฟล์การวิเคราะห์ของไหลขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (7)

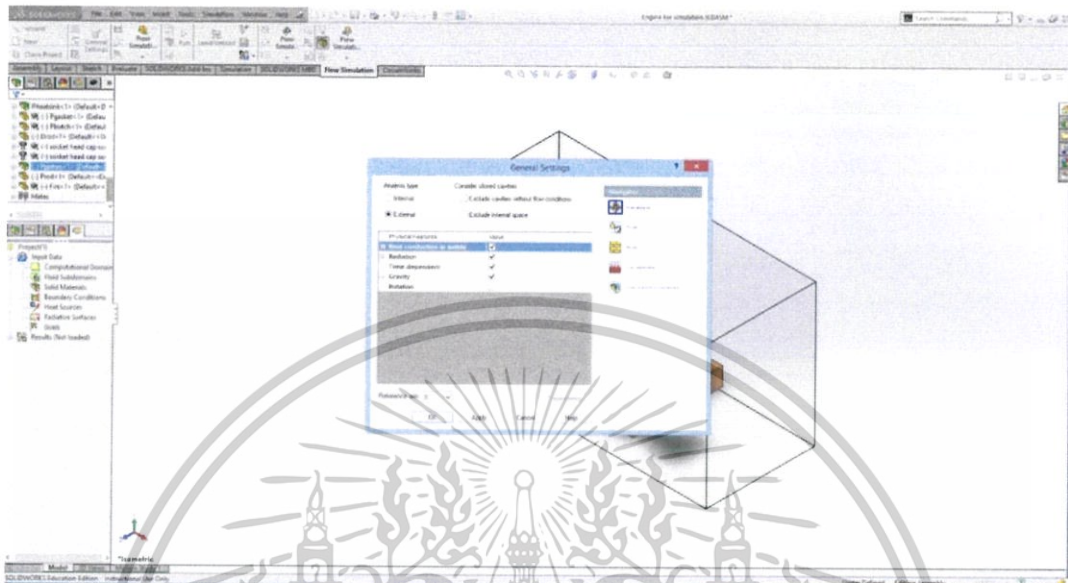
2. คลิกขวาที่ “Input Data” แล้วเลือก “General setting” เพื่อทำการตั้งค่า



รูปที่ 3.27 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (8)

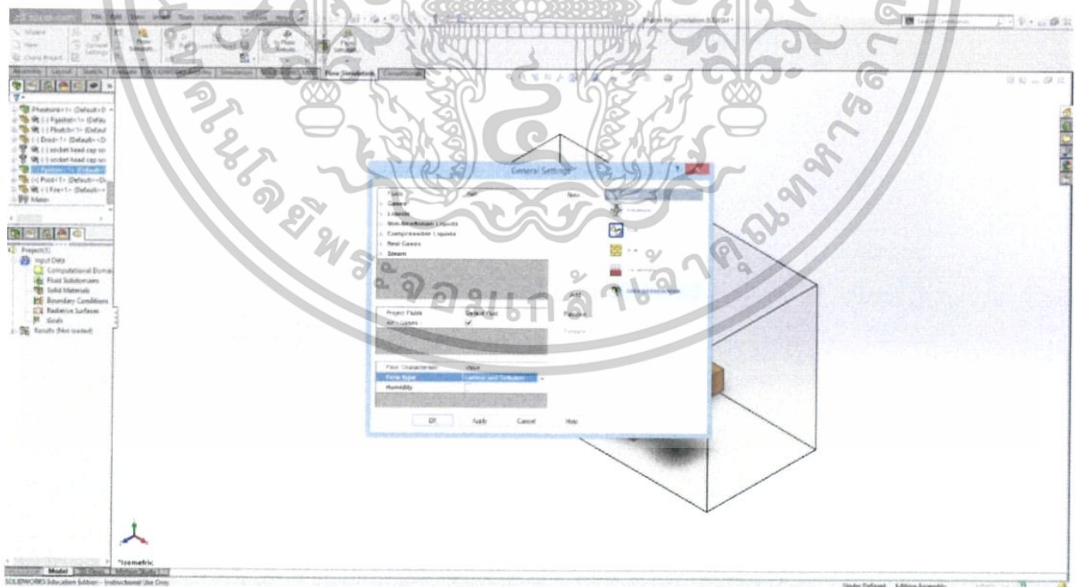
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตั้งค่า Analysis type เป็น External และคลิกเลือก “Heat conduction in solids”
“Time-dependence” และ “Gravity”



รูปที่ 3.28 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (9)

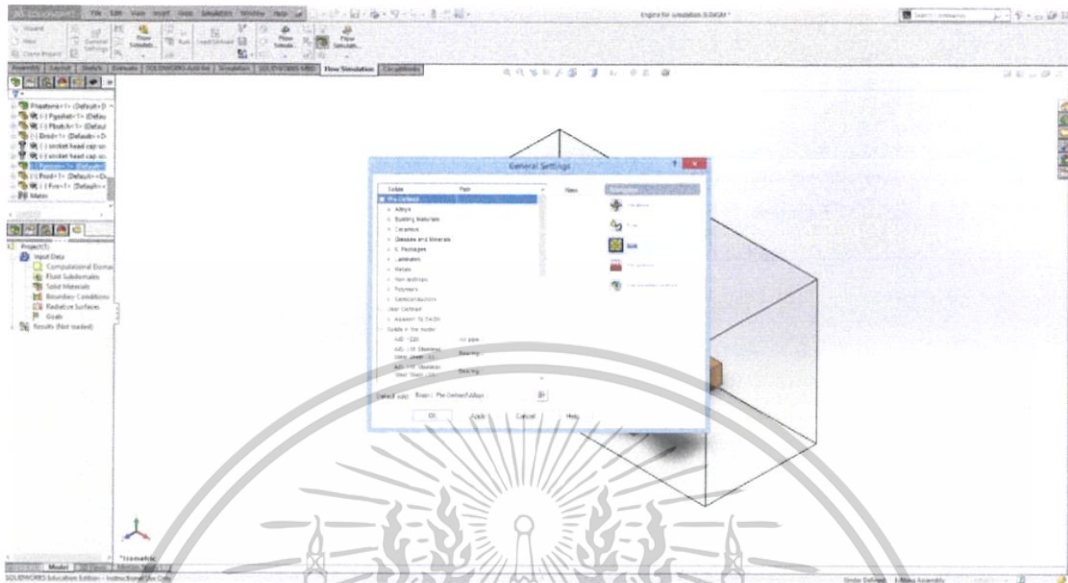
4. ตั้งค่า “Air (gases)” เป็น Default fluid



รูปที่ 3.29 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (10)

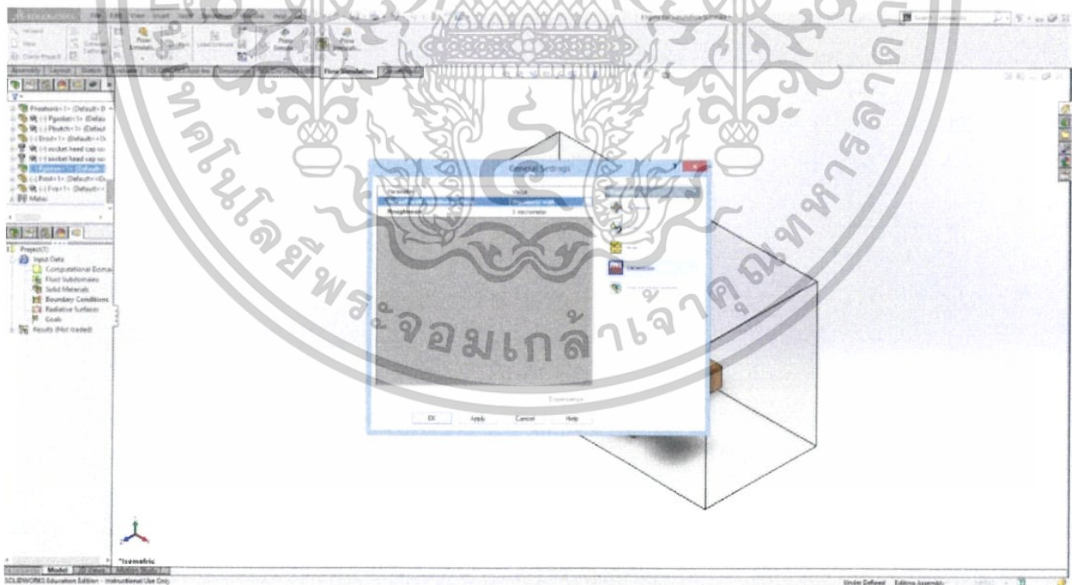
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตั้งค่า Solids โดยเลือก “Brass” เป็น Default Fluid



รูปที่ 3.30 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (11)

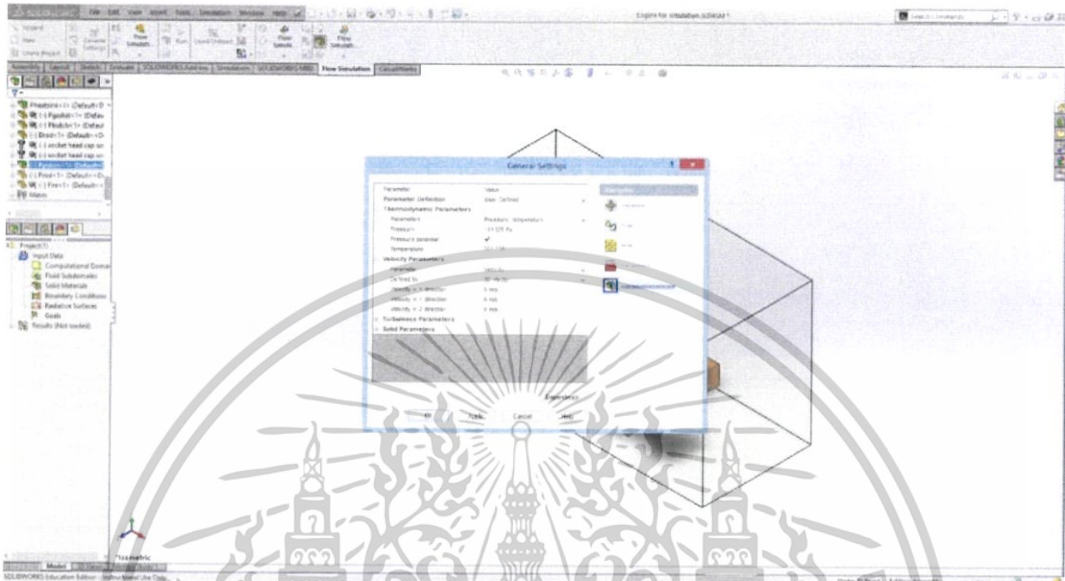
6. Wall condition ให้ตั้งค่าไว้ตามเดิม



รูปที่ 3.31 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (12)

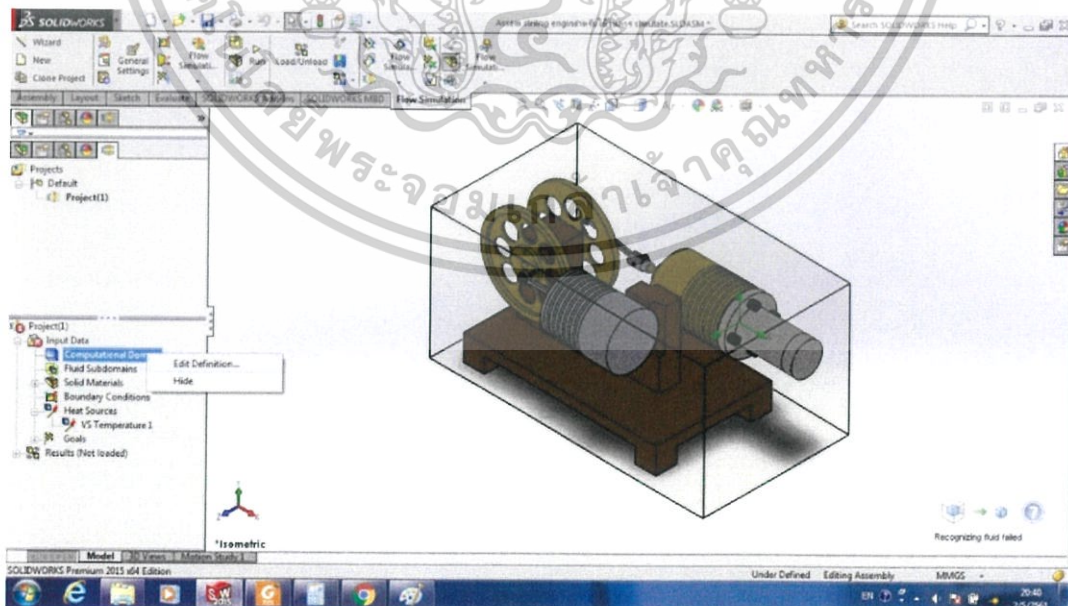
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ตั้งค่า Initial and ambient condition โดยในส่วนของ Thermodynamic parameter ให้ตั้งค่า Temperature ไว้ที่ “301.15K” และใน Solid parameter ก็ตั้งค่า Temperature ที่ “301.15K” เช่นเดียวกัน จากนั้นกดตกลง



รูปที่ 3.32 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (13)

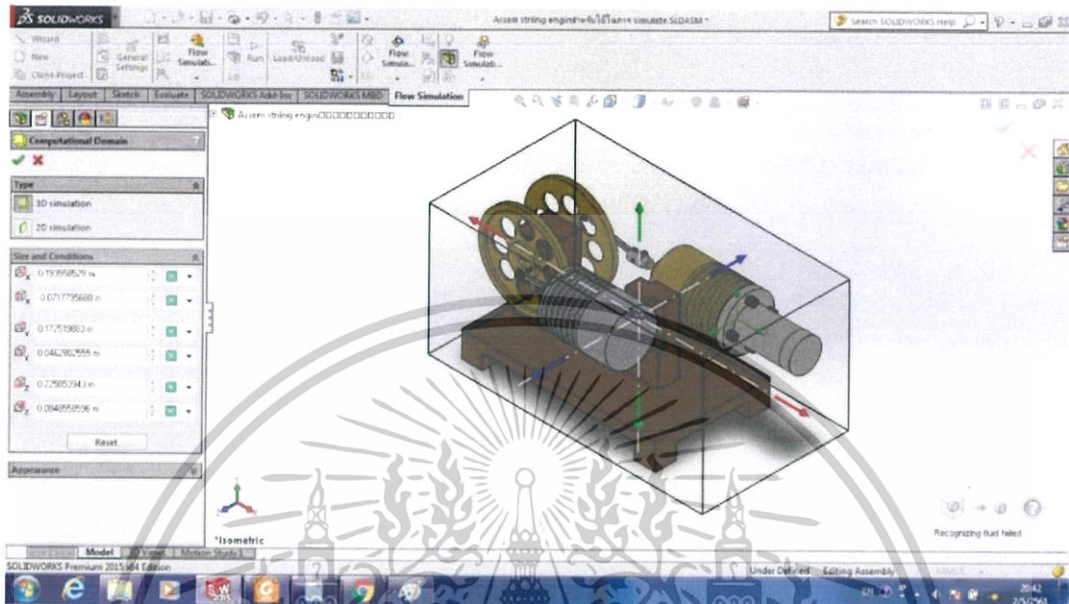
8. จากนั้นให้คลิกขวาที่ “Computational Domain” แล้วเลือก “Edit Definition” เพื่อกำหนดขนาดของโดเมน



รูปที่ 3.33 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (14)

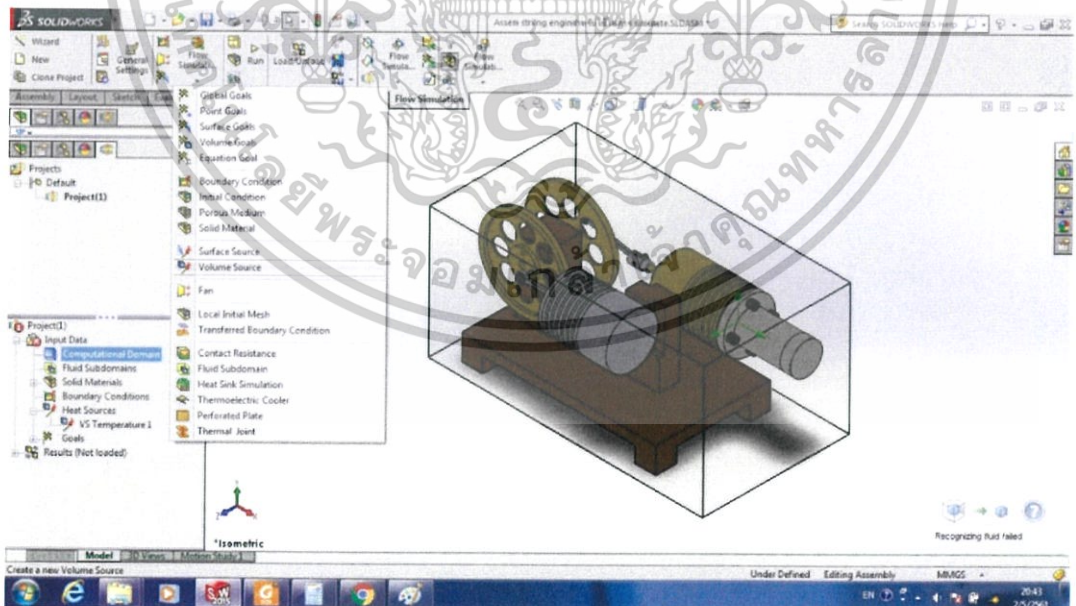
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. กำหนดค่าโดเมนโดยลากลูกศรที่ทิศ X Y และ Z ควรกำหนดให้โดเมนมีความพอดีกับชิ้นงานไม่ควรใหญ่เกินไปเพราะจะทำให้เวลาในการวิเคราะห์หมีค่ามาก



รูปที่ 3.34 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (15)

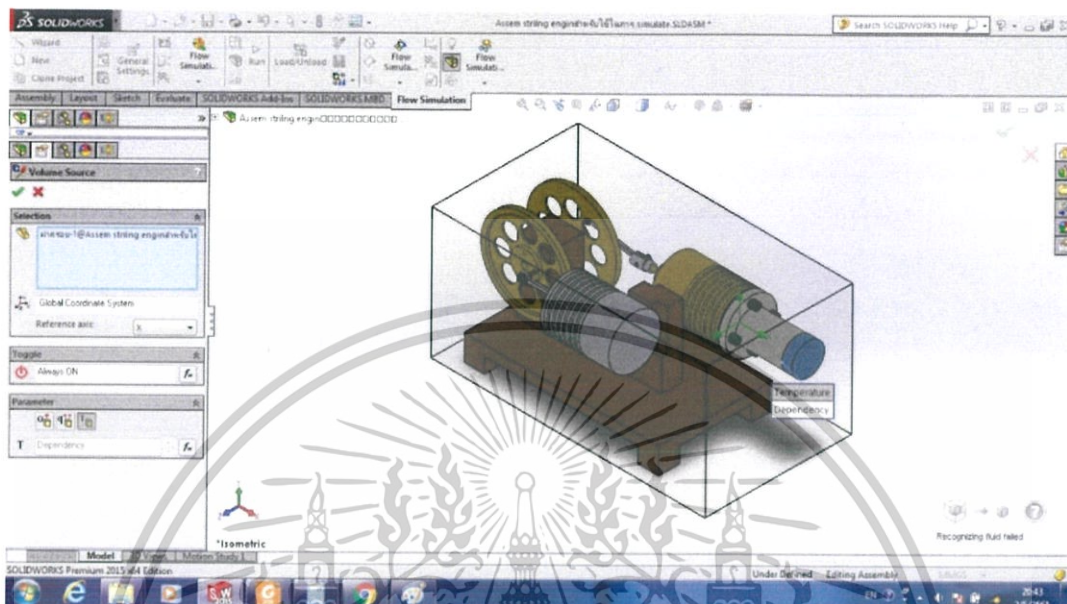
10. คลิกที่ “Flow Simulation Features” แล้วเลือก “Volume Source”



รูปที่ 3.35 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (16)

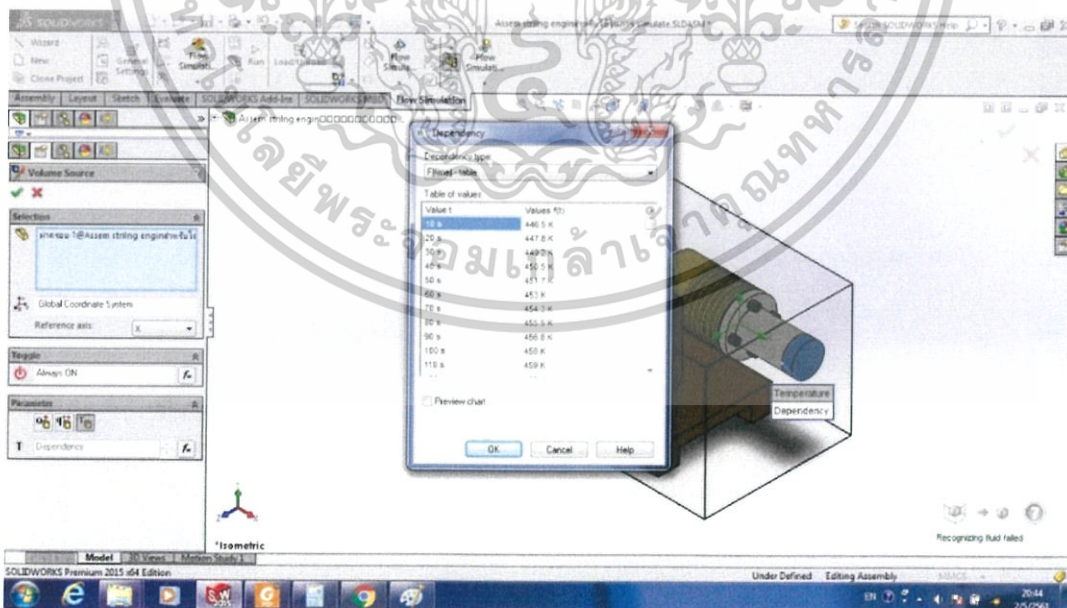
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. Selection ให้เลือกเป็นชิ้นส่วน“Fire”จากนั้นเลือก Parameter เป็นTemperature โดยกำหนดให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยคลิกที่ไอคอน “fx”



รูปที่ 3.36 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (17)

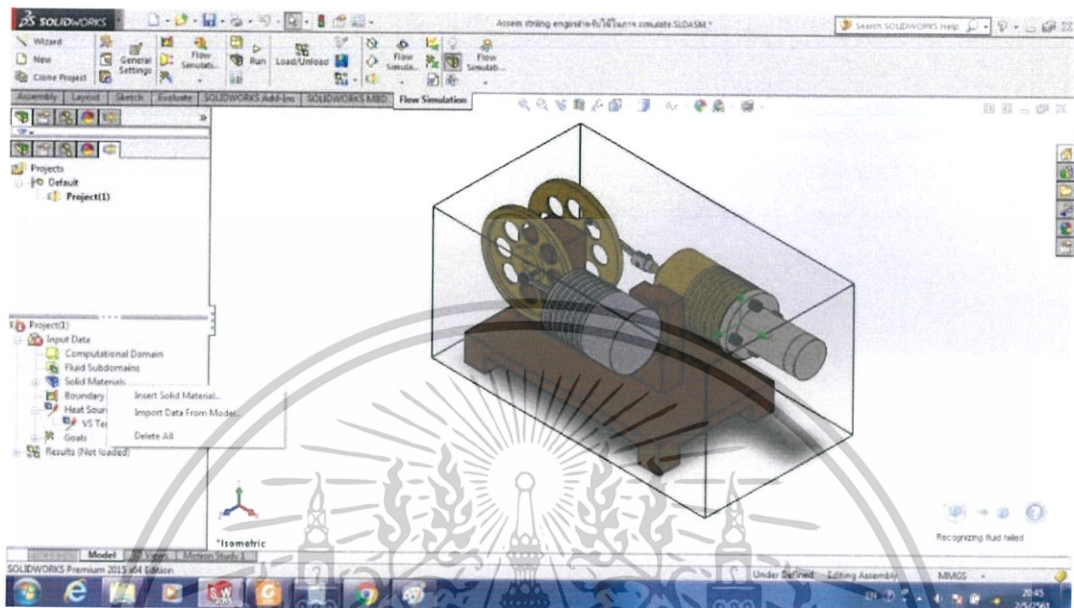
12. เลือก Dependency type เป็น “F(time)-table” จากนั้นใส่ค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 3.37 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (18)

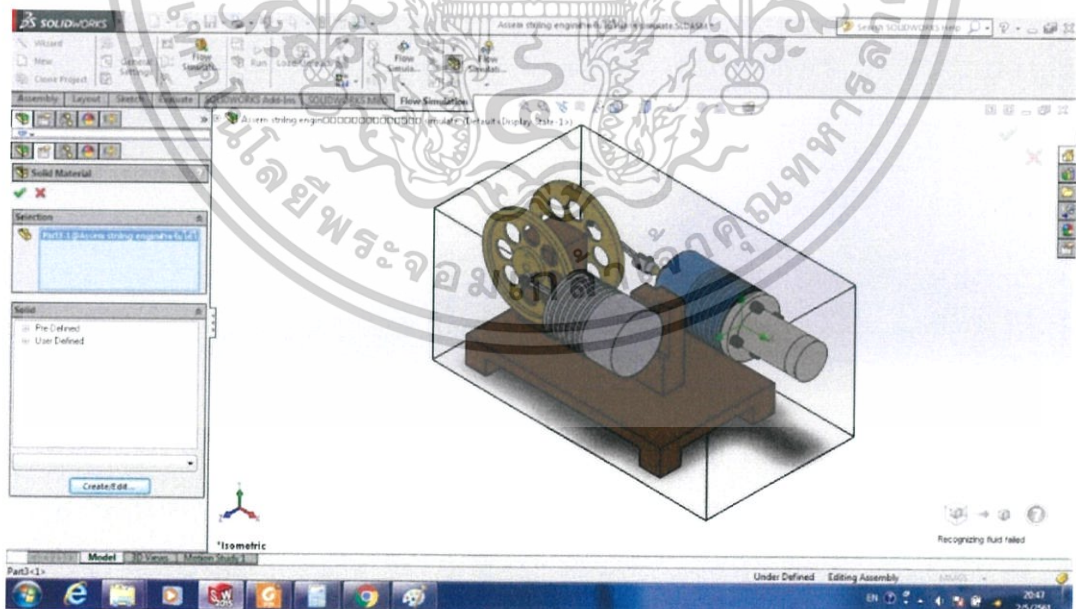
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. จากนั้นทำการกำหนด Solid Material โดยไปคลิกขวาที่ “Solid Materials” แล้วเลือก “Insert Materials”



รูปที่ 3.38 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (19)

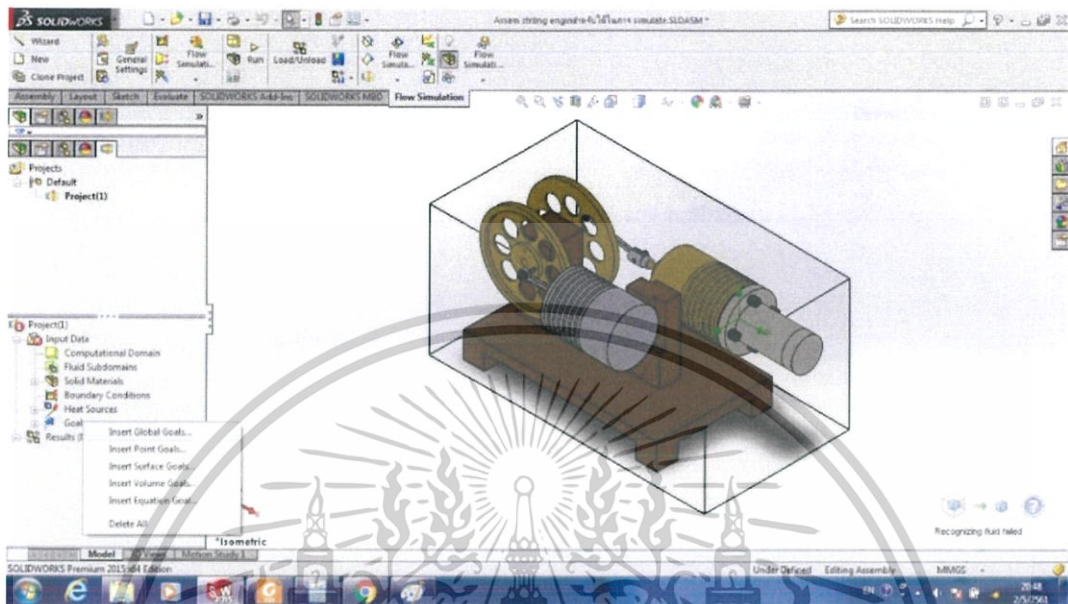
14. เลือก Material ของชิ้นส่วนต่างๆ ตามที่ออกแบบไว้แล้วกดตกลง



รูปที่ 3.39 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (20)

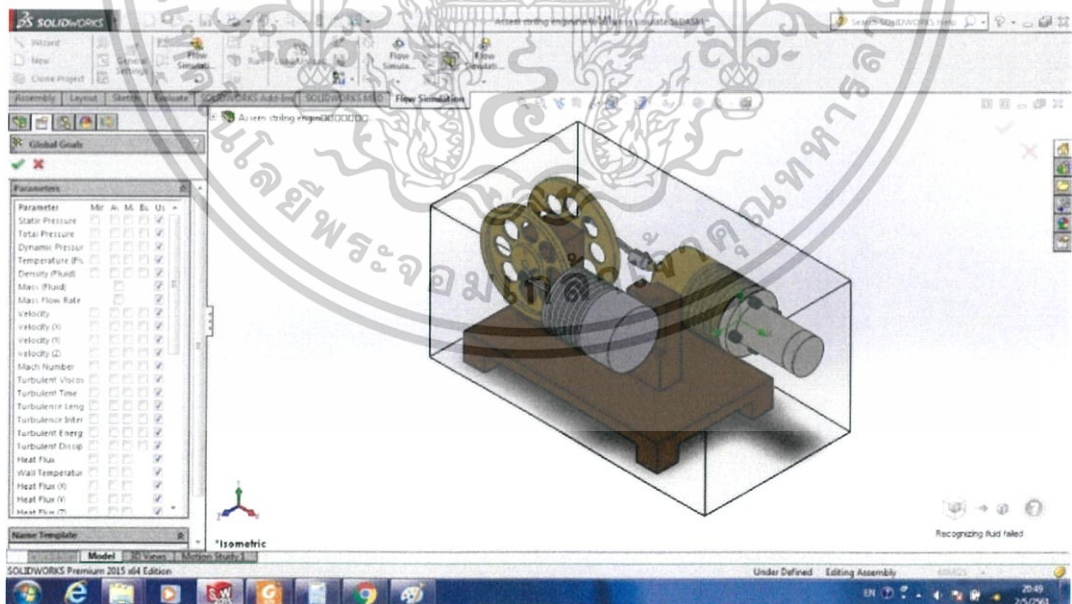
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. กำหนด Goal ของการวิเคราะห์โดยคลิกขวาที่ “Goal” จากนั้นเลือก “Insert Global Goals”



รูปที่ 3.40 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (21)

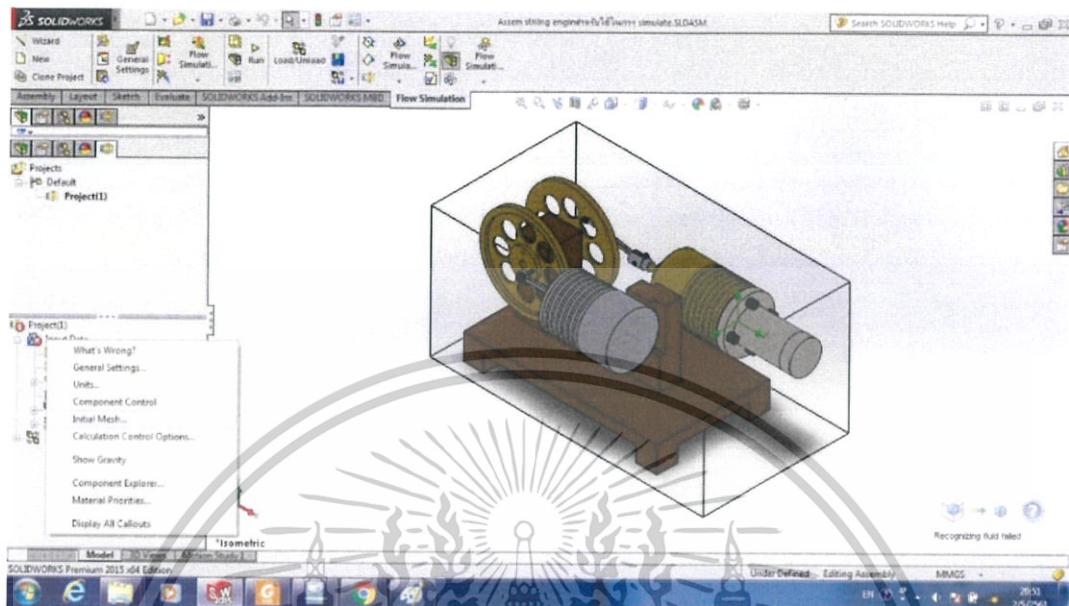
16. ทำการเลือก Goal ที่ต้องการศึกษา จากนั้นกดตกลง



รูปที่ 3.41 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (22)

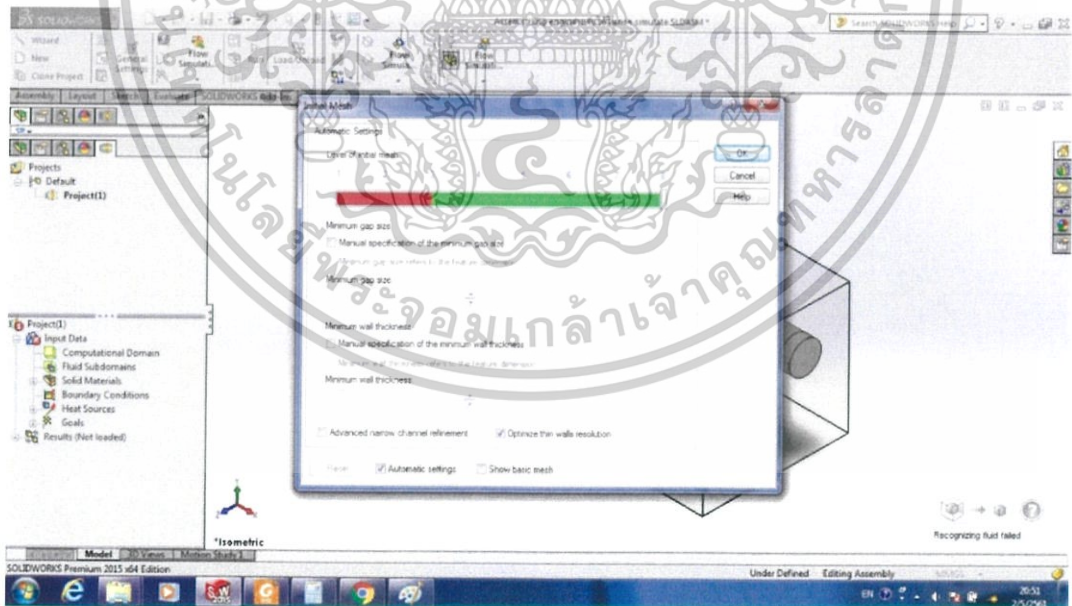
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. คลิกที่ “Initial Mesh”



รูปที่ 3.42 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (23)

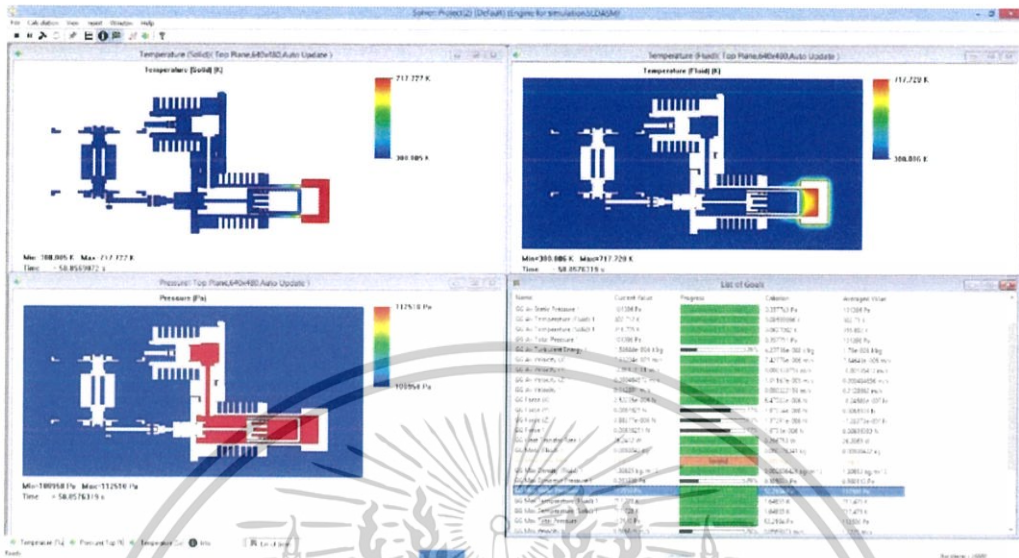
18. ทำการตั้งค่า “Level of Initial Mesh” เป็นระดับ 8 จากนั้นกดตกลง



รูปที่ 3.43 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (24)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

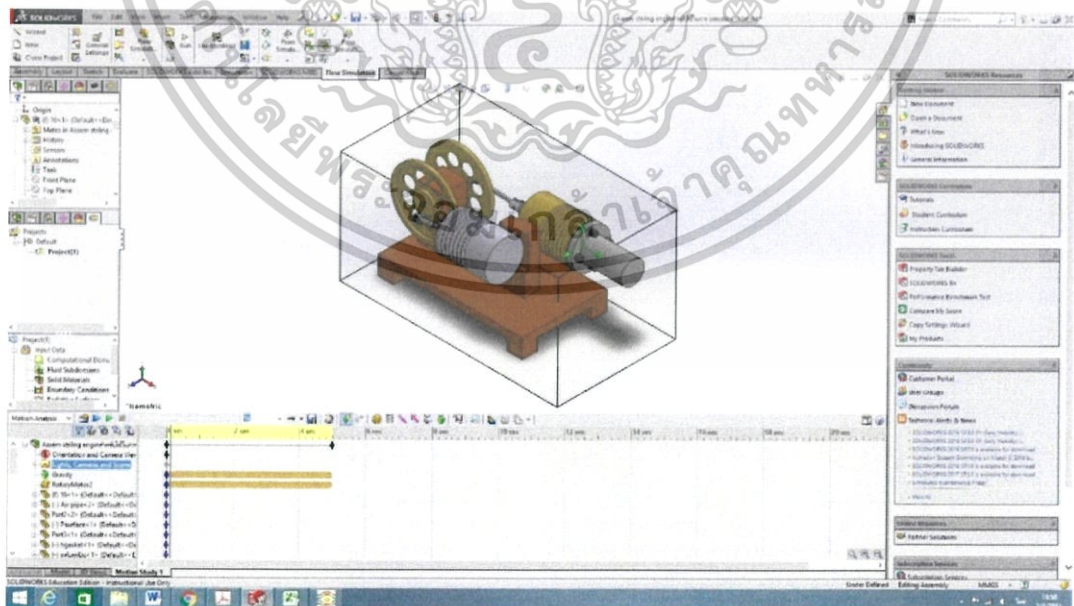
19. จากนั้นกด “Run” โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ โดยจะมีหน้าต่างดังรูป



รูปที่ 3.44 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (25)

- ใช้ฟังก์ชัน Simulation เพื่อวิเคราะห์แรงบิดของเครื่องยนต์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

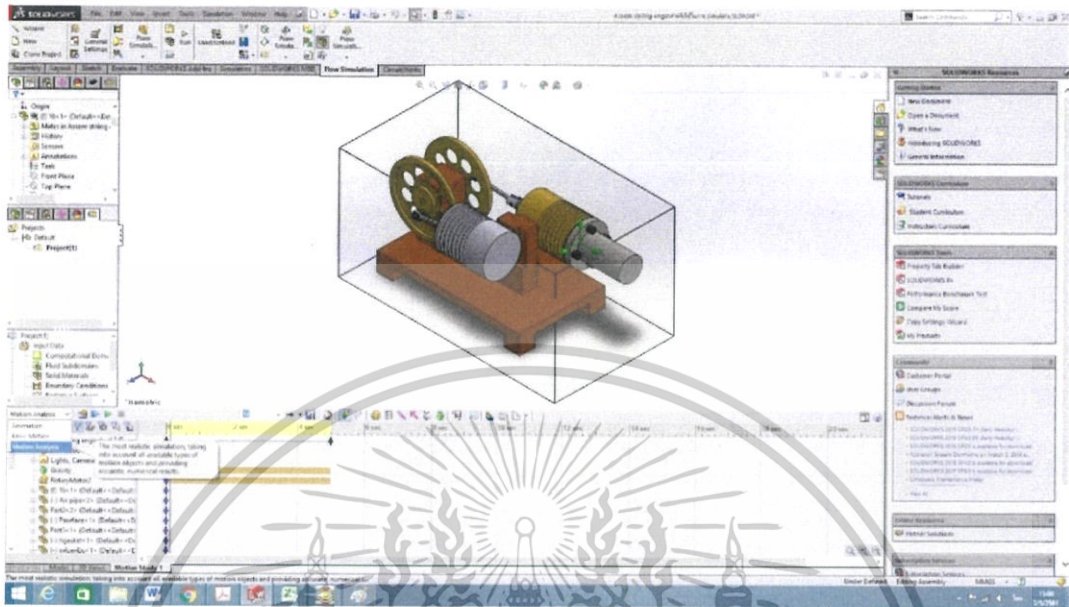
1. เมื่อทำการ Assembly แล้วให้เลือก “Motion study” ที่แถบด้านล่างของหน้าโปรแกรม เพื่อทำการวิเคราะห์แรงบิดของเครื่องยนต์



รูปที่ 3.45 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (26)

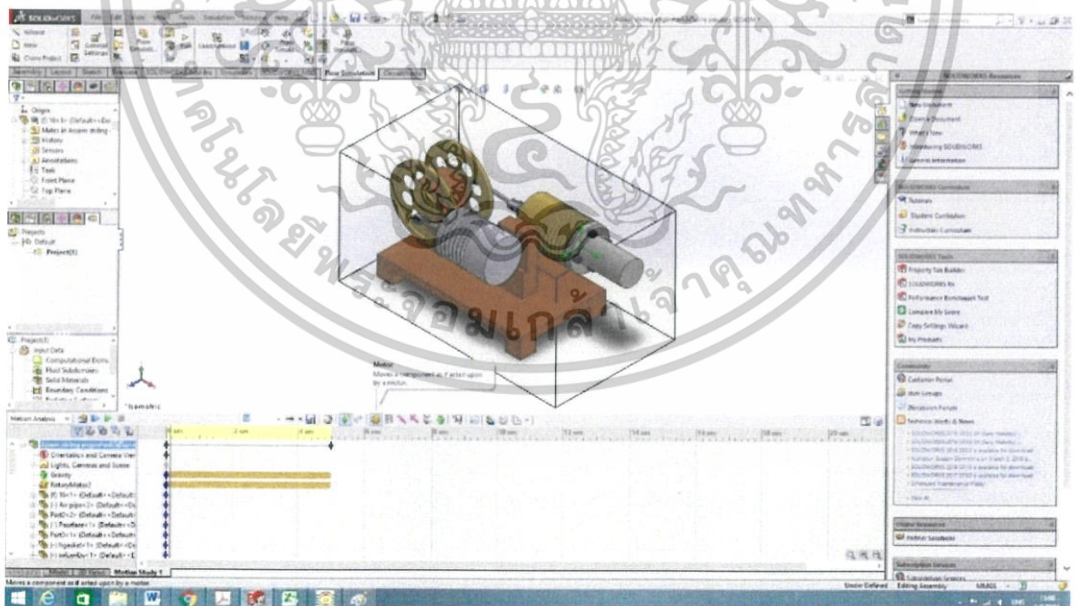
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เลือกเป็น “Motion analysis”



รูปที่ 3.46 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (27)

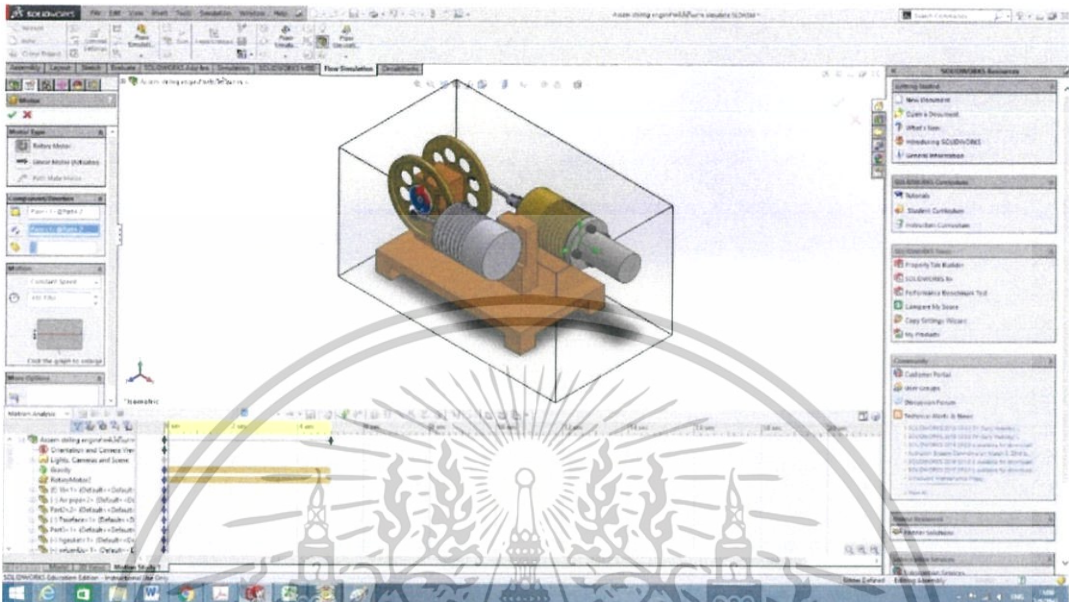
3. ต้องทำให้เครื่องยนต์หมุนได้ โดยการใส่มอเตอร์ โดยเลือก “Motor”



รูปที่ 3.47 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (28)

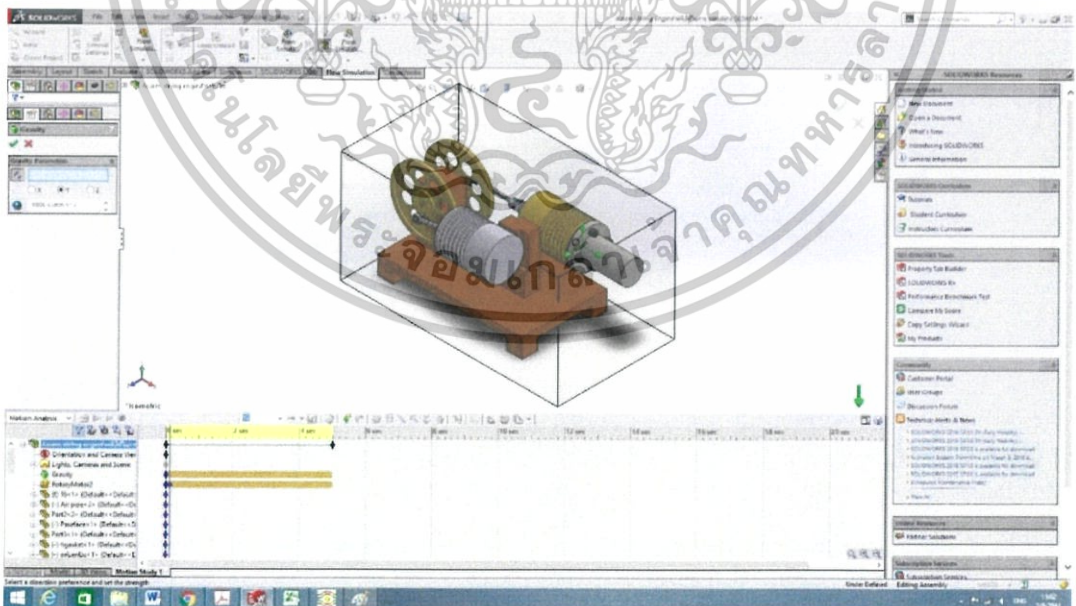
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใส่มอเตอร์ที่ล้อของเครื่องยนต์ โดยคลิกที่ล้อของเครื่องยนต์ ที่แถบ Motion เลือก เป็น “Constant speed” และใส่ความเร็วรอบเป็น 450RPM หรือตามต้องการ แล้วกดถูก



รูปที่ 3.48 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (29)

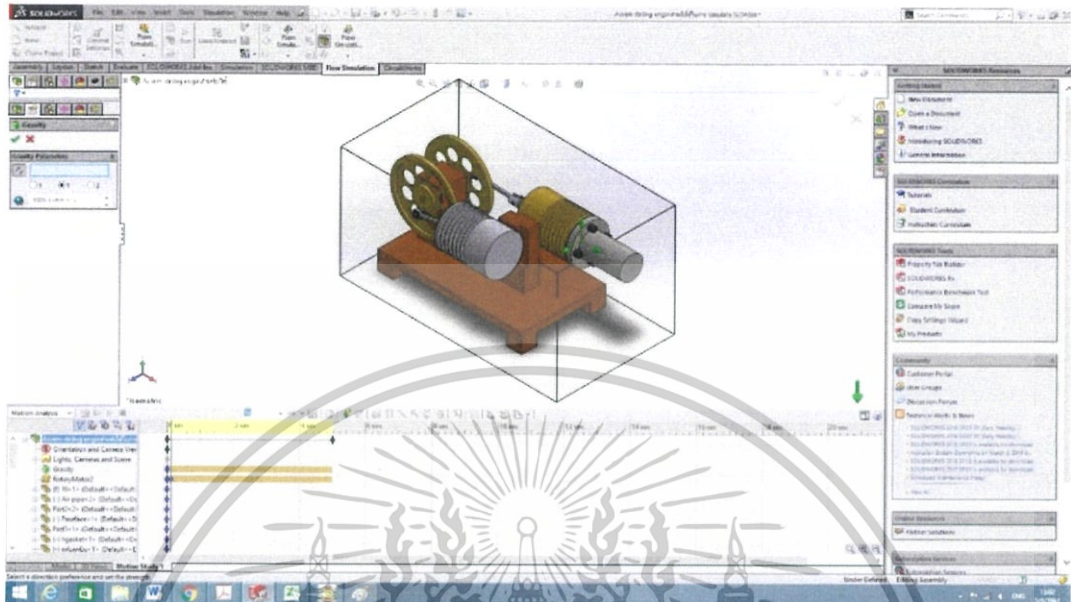
5. ใส่แรงโน้มถ่วง เพื่อการวิเคราะห์ที่ถูกต้องเมื่ออยู่บนพื้นโลก โดยกดเลือก “Gravity”



รูปที่ 3.49 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (30)

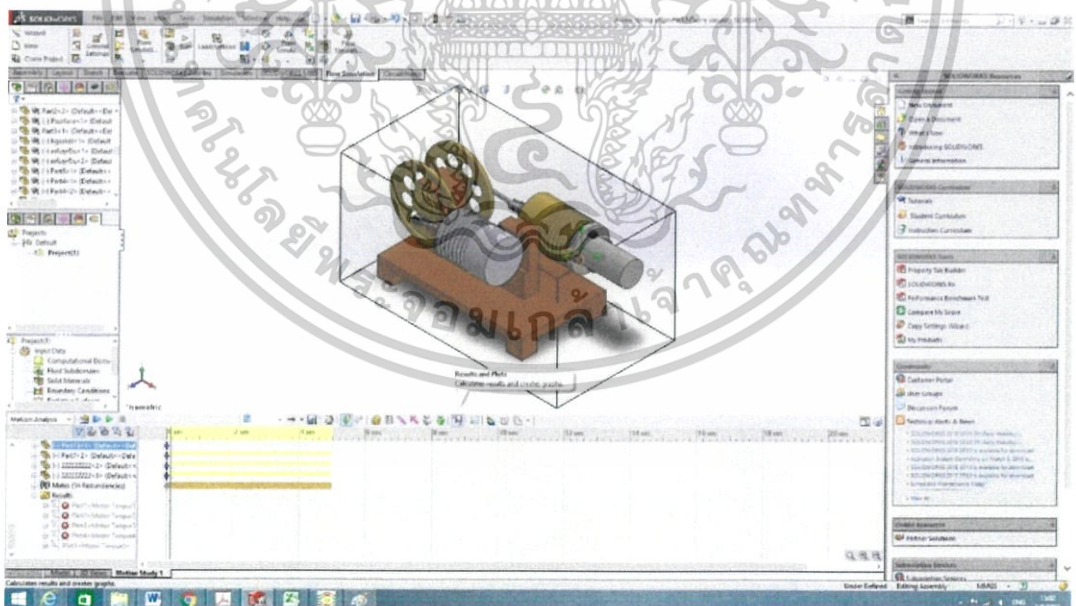
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เลือกแกนแรงโน้มถ่วงเป็นแกนตั้ง ในที่นี้คือแกน “Y”



รูปที่ 3.50 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (31)

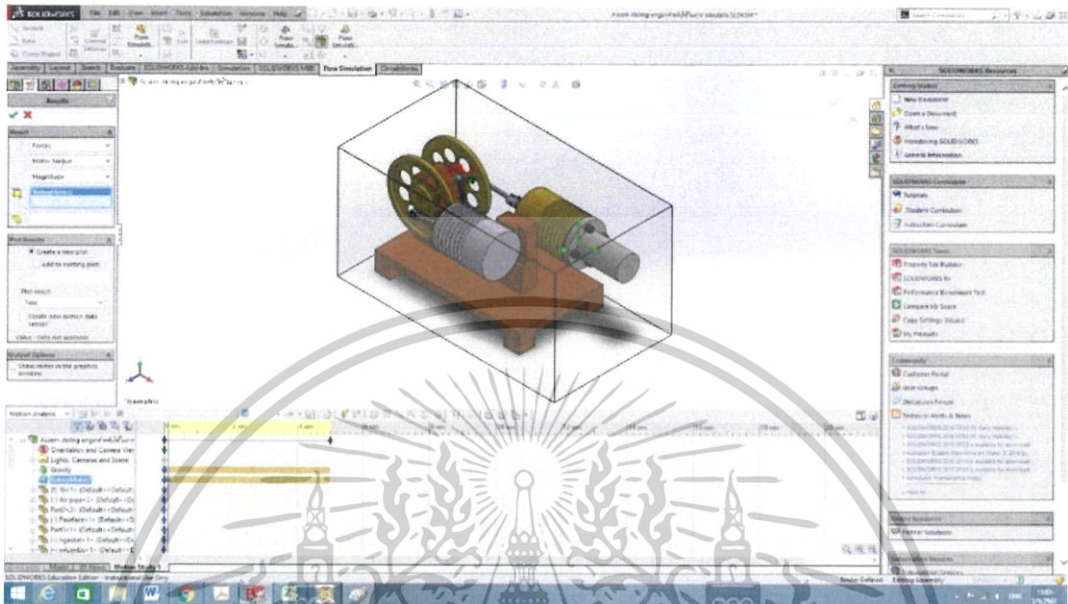
7. เลือกให้การวิเคราะห์แสดงผล โดยเลือก “Results and plots”



รูปที่ 3.51 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (32)

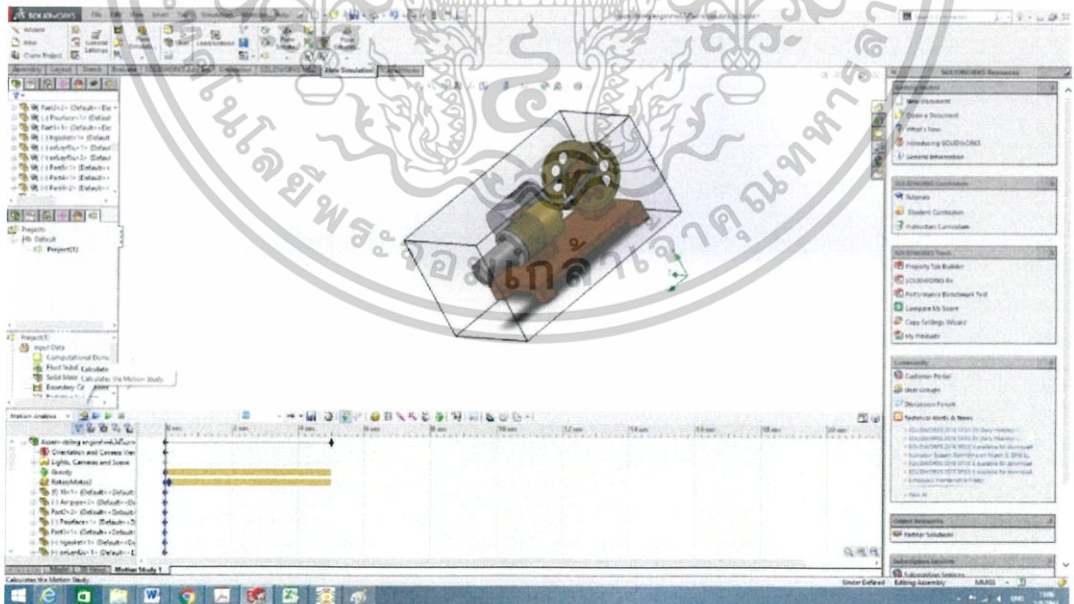
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. กำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการให้แสดง ในแถบ Results เลือก “Forces” ,”Motion torque” และ “Magnitude” จากนั้นเลือกจุดที่ต้องการวิเคราะห์เป็น “Rotarymotor”



รูปที่ 3.52 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (33)

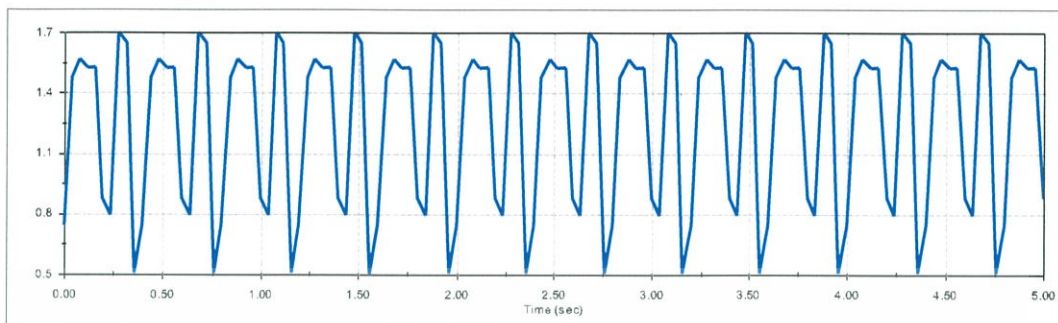
9. จากนั้นกด “Calculate” เพื่อเริ่มการวิเคราะห์



รูปที่ 3.53 หน้าต่างโปรแกรม SolidWork 2015 (34)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เมื่อทำการวิเคราะห์สำเร็จ โปรแกรมจะแสดงกราฟผลลัพธ์ที่เรากำหนดไว้ ดังนี้

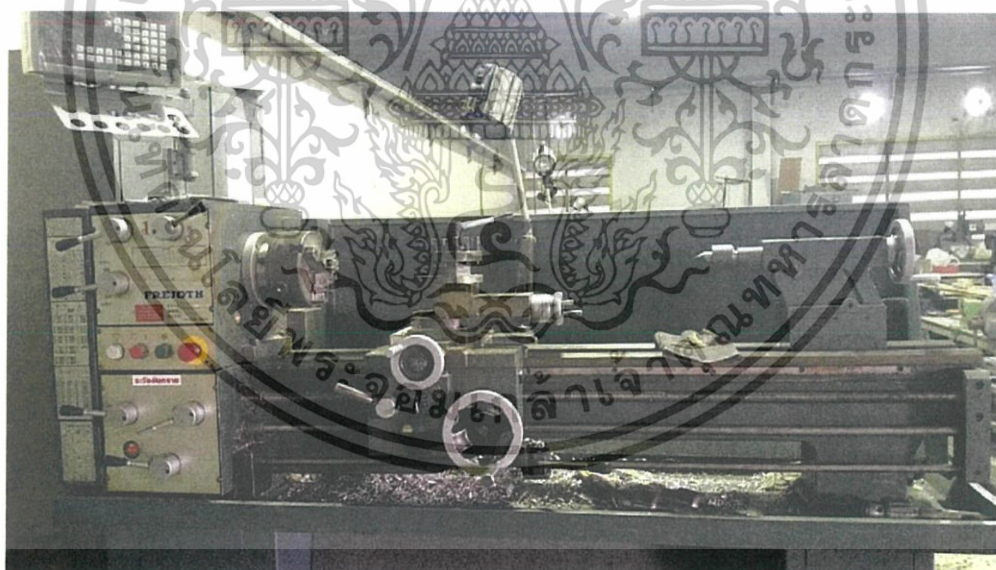


รูปที่ 3.54 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม Solidworks 2015

3.4 เครื่องมือในการสร้างและการวัดผลเพื่อวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

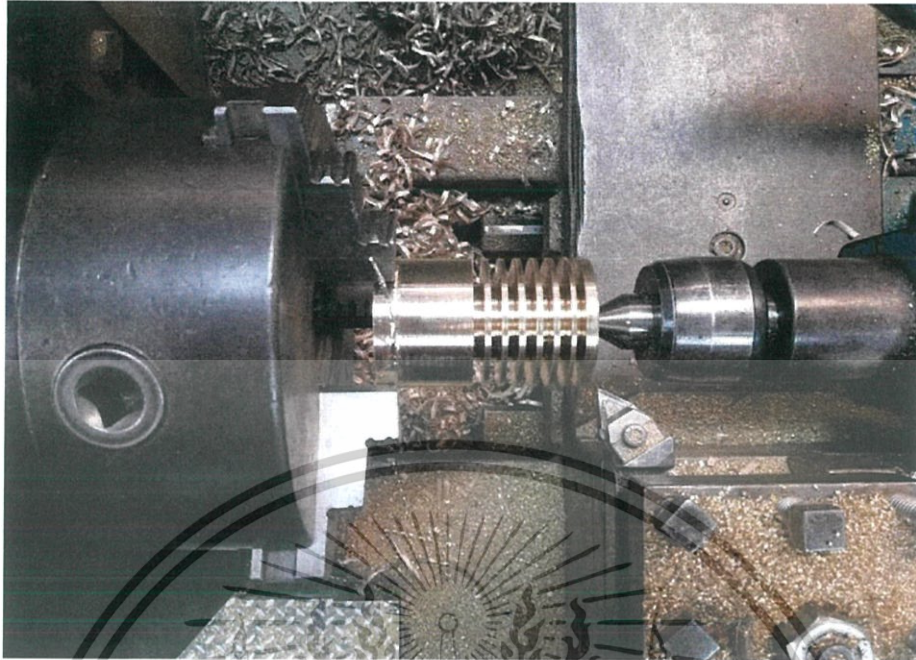
ในการสร้างชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง จำเป็นต้องใช้เครื่องมือทางกลต่างๆ ในการผลิต อาทิเช่น เครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องเจาะ เครื่องตัด เป็นต้น

- เครื่องกลึง (Manual lathe) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



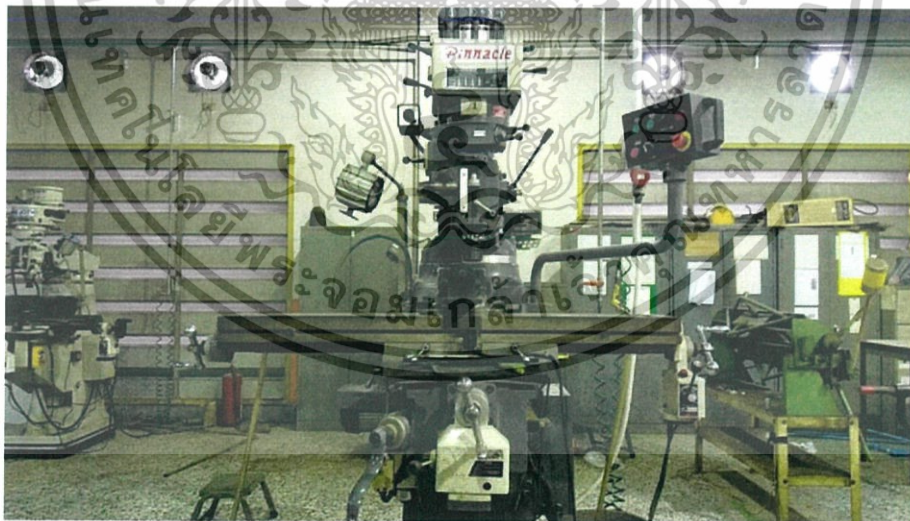
รูปที่ 3.55 เครื่องกลึง (Manual lathe)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.56 ขณะกลึงกระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์

- เครื่องกัด (Milling machine) เครื่องมือหลักที่ใช้ในการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการกัดเจาะรูหลายๆรูที่มีรูปแบบเป็นวง (Circular pattern)



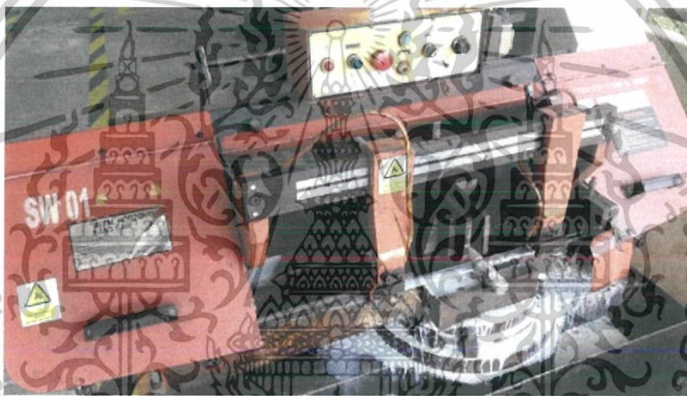
รูปที่ 3.57 เครื่องกัด (Milling machine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องตัด หรือ เลื่อยตัดเหล็ก (Chain saw) ใช้สำหรับตัดโลหะขนาดใหญ่

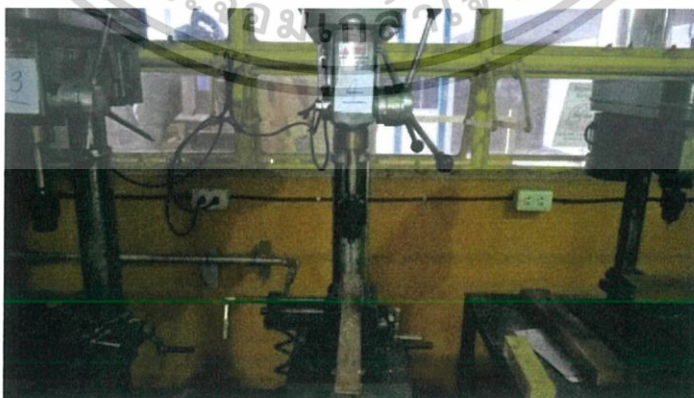


รูปที่ 3.58 เครื่องตัด หรือ เลื่อยตัดเหล็ก (Chain saw) (1)



รูปที่ 3.59 เครื่องตัด หรือ เลื่อยตัดเหล็ก (Chain saw) (2)

- เครื่องเจาะ (Drilling machine)

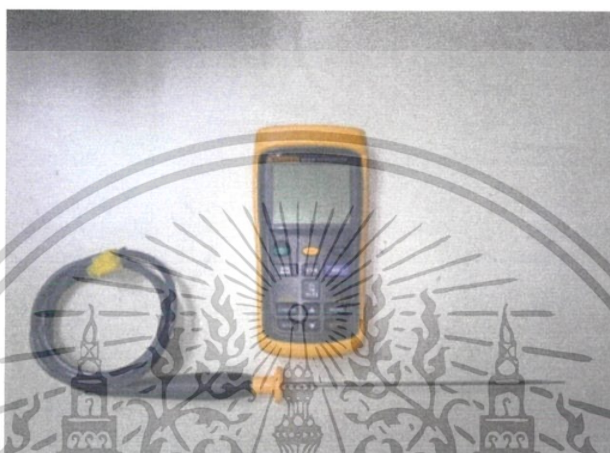


รูปที่ 3.60 เครื่องเจาะ (Drilling machine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 เครื่องมือในการวัดผลเพื่อการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ในการวัดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์นั้นต้องทำการวัดอุณหภูมิของกระบอกสูบ ทั้งสองฝั่งและรอบการทำงานของเครื่องยนต์เพื่อนำมาคำนวณความดันภายในของเครื่องยนต์เพื่อใช้ในการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในของเครื่องยนต์กับปริมาตรขยายซึ่งจะนำค่าความดันที่ได้ไปหาค่ากำลังขาออกของเครื่องยนต์ในหนึ่งวัฏจักรและประสิทธิภาพทางความร้อน โดยในการเก็บข้อมูลนั้นจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดข้อมูลดังรูป



รูปที่ 3.61 เทอร์โมมิเตอร์ FLUKE รุ่น 54-2B และเทอร์โมคัปเปิล FLUKE รุ่น 80pk-26

- เครื่องวัดความเร็วรอบ Lutron รุ่น DT-2236



รูปที่ 3.62 เครื่องวัดความเร็วรอบ Lutron รุ่น DT-2236

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

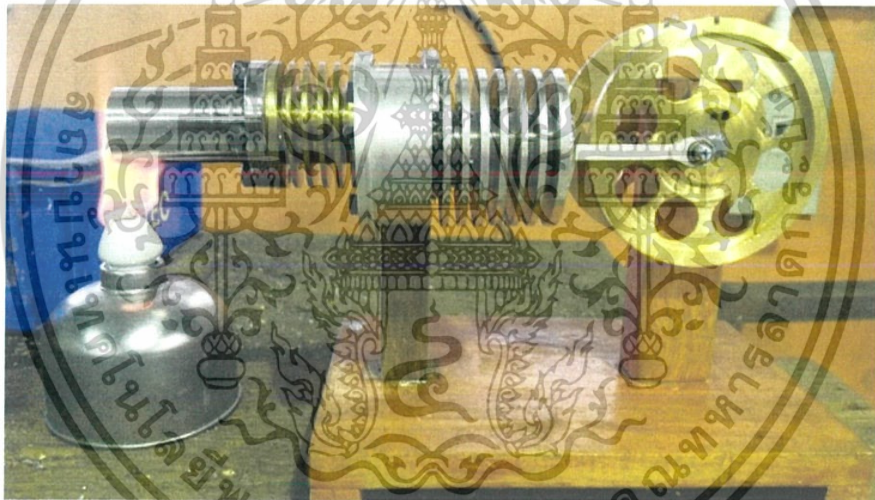
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในส่วนของผลการวิจัยจะแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่

1. ผลจากการวัดค่าต่างๆ และการคำนวณของเครื่องยนต์ โดยผลที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์
2. ผลการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยใช้โปรแกรม SolidWorks โดยผลการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ จะสามารถบอกสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

4.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์

เมื่อทำการสร้างชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ จากนั้นนำมาประกอบจะได้เป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ล้อตุ้มกำลังคู่ชนิดแกมมา ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถดูรายละเอียดและขนาดของชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ได้ในภาคผนวก



รูปที่ 4.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อตุ้มกำลังคู่ชนิดแกมมา

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์

อัตราส่วนกำลังอัด	2.5	
ของไหลทำงาน	อากาศ	
อุณหภูมิแหล่งความร้อน (°C)	550	
วัสดุ	ฮีตเตอร์	เหล็กกล้าไร้สนิม
	กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์	ทองเหลือง
	กระบอกสูบกำลัง	อะลูมิเนียม
	ลูกสูบดิสเพลสเซอร์	แก้ว
	ลูกสูบกำลัง	แก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

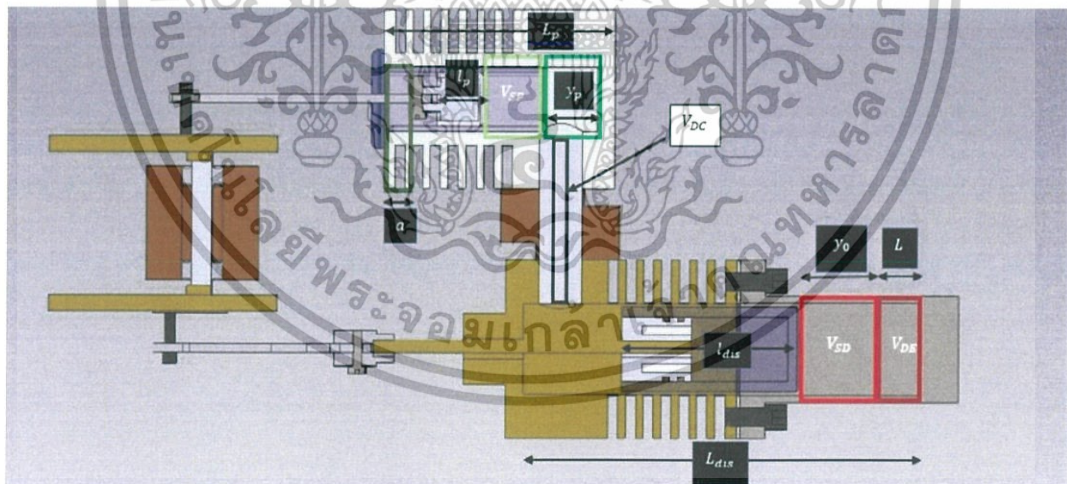
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ (ต่อ)

วัสดุ	ลัดตุนกำลัง	ทองเหลือง
ปริมาตรตาย (cm^3)	กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์(V_{DE})	6.87
	กระบอกสูบลูกสูบกำลัง(V_{DC})	18.92
ปริมาตรกวาด(cm^3)	กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์(V_{SD})	8.84
	กระบอกสูบลูกสูบกำลัง(V_{SP})	3.18
ระยะชัก (cm)	1.8	
กำลังขาออก (W)	0.54	
ประสิทธิภาพทางความร้อน(%)	40	

จากตารางที่ 4.1 แสดงถึงข้อมูลจำเพาะต่างๆ ที่ได้จากการวัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ขณะทำงาน ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องยนต์มีกำลังขาออกของเครื่องยนต์ได้ 0.54 วัตต์ และประสิทธิภาพทางความร้อน 40 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบประมาณ 450 รอบต่อนาที

4.1.1 การคำนวณและ การวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์

เราสามารถคำนวณค่าปริมาตรต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ได้สร้างขึ้นมา เพื่อนำมาวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์ ได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงปริมาตรและระยะต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

- คำนวณปริมาตรตายของปริมาตรขยาย (V_{DE}) จากสมการ

$$V_{DE} = \frac{\pi D_{dis}^2 L}{4} \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{\pi(25\text{mm})^2(14)}{4}$$

$$= 6,872.2339\text{mm}^3 = 6.8722\text{cm}^3$$

- คำนวณปริมาตรกวาดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (V_{SD}) จากสมการ

$$V_{SD} = \frac{\pi D_{dis}^2 y_0}{4} \quad (2)$$

$$= \frac{\pi(25\text{mm})^2(18\text{mm})}{4}$$

$$= 8,835.7293\text{mm}^3 = 8.8357\text{cm}^3$$

- คำนวณปริมาตรตายของปริมาตรบีบอัด (V_{DC}) จากสมการ

$$V_{DC} = \frac{1}{4}(\pi D_{dis}^2 [L_{dis} - (L + y_0 + l_{dis})] + \pi D_p^2 [L_p - (l_p + y_p + a)]) \quad (3)$$

$$= \frac{1}{4}(\pi(25\text{mm})^2 [111\text{mm} - (14 + 18 + 47)\text{mm}]) +$$

$$(\pi(15\text{mm})^2 [60\text{mm} - (14 + 16 + 11.84)\text{mm}])$$

$$= 18,917.1002\text{mm}^3 = 18.9171\text{cm}^3$$

- คำนวณปริมาตรกวาดของกระบอกสูบกำลัง (V_{SP}) จากสมการ

$$V_{SP} = \frac{\pi D_p^2 y_0}{4} \quad (4)$$

$$= \frac{\pi(15\text{mm})^2(18\text{mm})}{4}$$

$$= 3,180.8623\text{mm}^3 = 3.1809\text{cm}^3$$

นำค่าปริมาตรต่างๆ จากสมการ (1) (2) (3) และ (4) มาคำนวณหาค่าปริมาตรขยาย (V_E)

ปริมาตรบีบอัด (V_C) และปริมาตรรวม (V) ของเครื่องยนต์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คำนวณปริมาตรขยาย (Expansion volume) ของเครื่องยนต์ (V_E) ได้จากสมการ

$$V_E = \frac{V_{SD}}{2}(1 - \cos \theta) + V_{DE} \quad (5)$$

$$= \frac{8,835.7293 \text{ mm}^3}{2}(1 - \cos 0^\circ) + 6,872.2339 \text{ mm}^3$$

$$= 6,872.2339 \text{ mm}^3 = 6.8722 \text{ cm}^3$$

- คำนวณค่าปริมาตรบีบอัด (Compression volume) ของเครื่องยนต์ (V_C) ได้จากสมการ

$$V_C = \frac{V_{SD}}{2}[1 + \cos \theta] + \frac{V_{SP}}{2}[1 - \cos(\theta - \varphi)] + V_{DC} \quad (6)$$

$$= \frac{8,835.7293 \text{ mm}^3}{2}[1 + \cos(0^\circ)] + \frac{3,180.8623 \text{ mm}^3}{4}[1 - \cos(0^\circ - 90^\circ)]$$

$$+ 18,917.1002 \text{ mm}^3$$

$$= 28,548.0451 \text{ mm}^3 = 28,548.0451 \text{ cm}^3$$

- ผลรวมของปริมาตรทั้งหมด (Total volume) ในเครื่องยนต์ (V) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V = V_E + V_C \quad (7)$$

$$= 6.8722 \text{ cm}^3 + 28.5480 \text{ cm}^3 = 35.4202 \text{ cm}^3$$

นำสมการที่ (5) (6) และ (7) มาคำนวณที่ค่ามุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตั้งแต่ 0-360 องศา จะได้ค่าดังตาราง 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาตรของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ

มุมข้อเหวี่ยง (degree)	ปริมาตรขยาย (Cm ³)	ปริมาตรบีบอัด (Cm ³)	ปริมาตรรวม (Cm ³)
0	6.8722	28.5480	35.4203
10	6.9394	28.3428	35.2822
20	7.1387	28.0096	35.1483
30	7.4641	27.5586	35.0227
40	7.9058	27.0033	34.9091

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษา อนุญาตให้นำไปใช้สอนด้านวิชาการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาตรของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ (ต่อ)

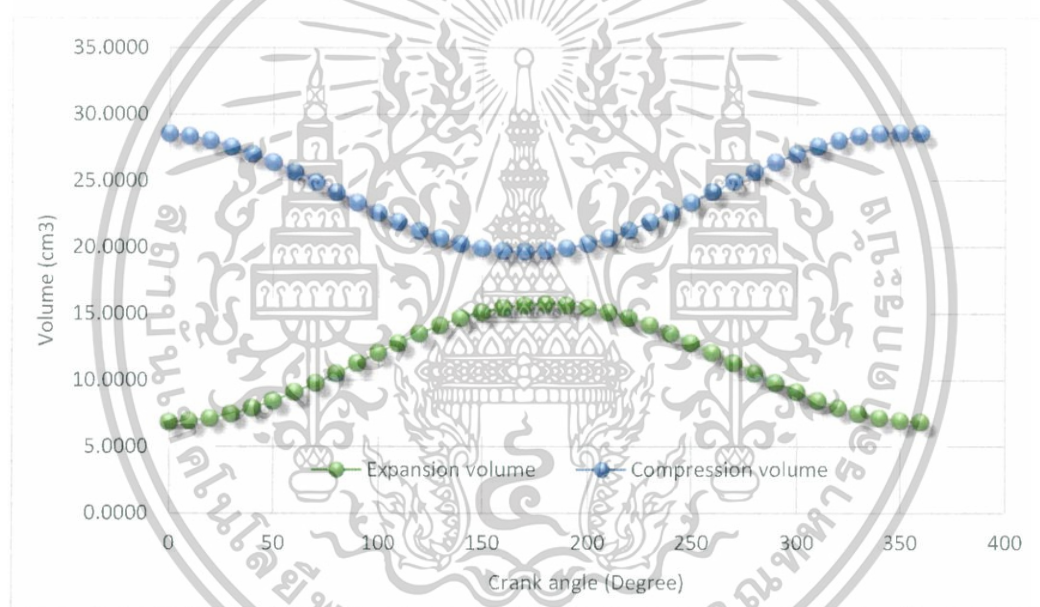
มุมข้อเหวี่ยง (degree)	ปริมาตรขยาย (Cm ³)	ปริมาตรบีบอัด (Cm ³)	ปริมาตรรวม (Cm ³)
50	8.4503	26.3608	34.8111
60	9.0812	25.6504	34.7316
70	9.7791	24.8939	34.6730
80	10.5229	24.1142	34.6371
90	11.2901	23.3350	34.6251
100	12.0573	22.5799	34.6371
110	12.8011	21.8719	34.6730
120	13.4990	21.2326	34.7316
130	14.1298	20.6813	34.8111
140	14.6744	20.2347	34.9091
150	15.1161	19.9066	35.0227
160	15.4415	19.7068	35.1483
170	15.6408	19.6413	35.2822
180	15.7080	19.7123	35.4203
190	15.6408	19.9175	35.5584
200	15.4415	20.2507	35.6923
210	15.1161	20.7018	35.8179
220	14.6744	21.2571	35.9314
230	14.1298	21.8996	36.0294
240	13.4990	22.6099	36.1090
250	12.8011	23.3664	36.1675
260	12.0573	24.1462	36.2034
270	11.2901	24.9254	36.2155
280	10.5229	25.6805	36.2034
290	9.7791	26.3884	36.1675
300	9.0812	27.0278	36.1090
310	8.4503	27.5791	36.0294
320	7.9058	28.0256	35.9314

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาตรของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ (ต่อ)

มุมข้อเหวี่ยง (degree)	ปริมาตรขยาย (Cm ³)	ปริมาตรบีบอัด (Cm ³)	ปริมาตรรวม (Cm ³)
330	7.4641	28.3538	35.8179
340	7.1387	28.5536	35.6923
350	6.9394	28.6190	35.5584
360	6.8722	28.5480	35.4203

จากข้อมูลตารางที่ 4.2 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรขยายและปริมาตรบีบอัดกับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 4.3 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรวมของเครื่องยนต์กับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรขยายและปริมาตรบีบอัดกับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรวมกับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าปริมาตรบีบอัดมีค่าที่มากกว่าปริมาตรขยายจึงทำให้กราฟทั้งสองไม่ตัดกัน ซึ่งสาเหตุมาจากการออกแบบความยาวของลูกสูบดีสเพลสเซอร์ที่น้อยไป ทำให้ปริมาตรบีบอัดมีค่ามากขึ้น ส่วนในรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่าปริมาตรรวมต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่มุมข้อเหวี่ยงที่ 90 องศาและ 270 องศา ซึ่งเป็นมุมจุดตัดของปริมาตรขยายและปริมาตรบีบอัดที่เหมาะสม ซึ่งปริมาตรรวมสูงสุดของเครื่องยนต์อยู่ที่ 35.4202 cm^3

- สามารถหาค่าอัตราส่วนกำลังอัดได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \xi &= 1 + (V_{SD} / V_{DE}) \quad (8) \\ &= 1 + \left(\frac{8.8357 \text{ cm}^3}{6.8722 \text{ cm}^3} \right) \\ &= 2.2857 \end{aligned}$$

- สามารถหาค่า γ และมุม σ เพื่อใช้คำนวณความดันภายในกระบอกสูบได้ดังนี้
หาอัตราส่วนของอุณหภูมิ (λ) ได้จากสมการ

$$\gamma = \frac{T_C}{T_H} \quad (9)$$

$$= \frac{306.8 \text{ K}}{513.9 \text{ K}} = 0.5696$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หาค่าอัตราส่วนของปริมาตรกวาด (χ_s) ได้จากสมการ

$$\chi_s = \frac{V_{SP}'}{V_{SD}} = \frac{V_{SD} + V_{SP}}{V_{SD}} \quad (10)$$

$$= \frac{8.8357 \text{ cm}^3 + 3.1809 \text{ cm}^3}{8.8357 \text{ cm}^3} = 1.3600$$

- หาค่าอัตราส่วนปริมาตรตายของปริมาตรขยาย (ν) ได้จากสมการ

$$\nu = \frac{V_{DE}}{V_{SD}} \quad (11)$$

$$= \frac{6.8722 \text{ cm}^3}{8.8357 \text{ cm}^3} = 0.7778$$

- หาค่าอัตราส่วนปริมาตรตายของปริมาตรบีบอัด (ζ) ได้จากสมการ

$$\zeta = \frac{V_{DC}}{V_{SD}} \quad (12)$$

$$= \frac{18.9171 \text{ cm}^3}{8.8357 \text{ cm}^3} = 2.1410$$

- หาค่า A ได้จากสมการ

$$A = (\gamma^2 + 2(\gamma - 1)\chi_s \cos \varphi + \chi_s^2 - 2\gamma + 1)^{1/2} \quad (13)$$

$$A = \sqrt{(0.5696)^2 + [2 \times (0.5696 - 1) \times 1.3600] \times \cos(90^\circ) + (1.3600)^2 - (2 \times 0.5696) + 1}$$

$$A = 1.3091$$

- หาค่า B ได้จากสมการ

$$B = (\gamma + 2\gamma\nu + \chi_s + 2\zeta + 1) \quad (14)$$

$$= (0.5696) + (2 \times 0.5696 \times 0.7778) + 1.3600 + (2 \times 2.1410) + 1$$

$$= 8.0977$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถคำนวณค่า λ ได้จากสมการ (เปลี่ยนค่า A B)

$$\lambda = \frac{A}{B} \quad (15)$$

$$= \frac{1.3091}{8.0977} = 0.1617$$

- สามารถคำนวณหาค่า δ ได้จากสมการ (เปลี่ยนค่า γ)

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\chi_s \sin \varphi}{\gamma + \cos \varphi + 1} \right) \quad (16)$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{(1.3600) \sin(90^\circ)}{0.5969 + \cos(90^\circ) + 1} \right) = 40.4194$$

- หาความดันภายในเครื่องยนต์
ที่มุมข้อเหวี่ยงเท่ากับ 0° จะสามารถหาความดันภายในเครื่องยนต์ได้จากสมการ

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{1 - \lambda^2}}{1 - \lambda \cdot \cos(\theta - \delta)} \quad (17)$$

$$= \frac{101.3 \text{ kPa} \sqrt{1 - (0.1617)^2}}{1 - 0.1617 \cos(0^\circ - 40.4194^\circ)}$$

$$= 114.0010 \text{ kPa}$$

นำสมการที่ (17) มาคำนวณหาความดันตามมุมข้อเหวี่ยงที่เปลี่ยนไป ตั้งแต่ $0-360$ องศา และเทียบกับปริมาตรรวมของเครื่องยนต์ (Total volume Cm^3) แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความดันภายในระบบและปริมาตรทั้งหมดที่ค่ามุมข้อเหวี่ยงต่างๆ

มุมข้อเหวี่ยง (degree)	ความดัน (kPa)	ปริมาตรขยาย (Cm^3)	ปริมาตรรวม (Cm^3)
0	114.0651	6.8722	35.4203
10	116.2169	6.9394	35.2822
20	117.8582	7.1387	35.1483
30	118.8907	7.4641	35.0227

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความดันภายในระบบและปริมาตรทั้งหมดที่คำนวณข้อเหวี่ยงต่างๆ (ต่อ)

40	119.2495	7.9058	34.9091
50	118.9114	8.4503	34.8111
60	117.8983	9.0812	34.7316
70	116.2739	9.7791	34.6730
80	114.1357	10.5229	34.6371
90	111.6028	11.2901	34.6251
100	108.8034	12.0573	34.6371
110	105.8636	12.8011	34.6730
120	102.8989	13.4990	34.7316
130	100.0091	14.1298	34.8111
140	97.2759	14.6744	34.9091
150	94.7636	15.1161	35.0227
160	92.5204	15.4415	35.1483
170	90.5813	15.6408	35.2822
180	88.9703	15.7080	35.4203
190	87.7037	15.6408	35.5584
200	86.7916	15.4415	35.6923
210	86.2401	15.1161	35.8179
220	86.0523	14.6744	35.9314
230	86.2292	14.1298	36.0294
240	86.7699	13.4990	36.1090
250	87.6713	12.8011	36.1675
260	88.9274	12.0573	36.2034
270	90.5283	11.2901	36.2155
280	92.4579	10.5229	36.2034
290	94.6925	9.7791	36.1675
300	97.1974	9.0812	36.1090
310	99.9248	8.4503	36.0294
320	102.8110	7.9058	35.9314
330	105.7748	7.4641	35.8179

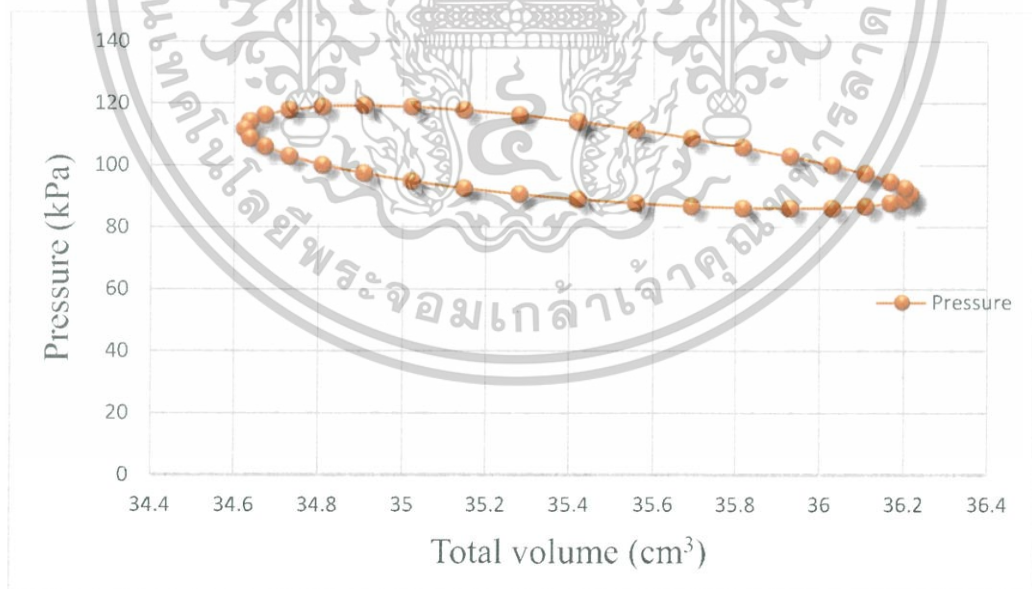
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความดันภายในระบบและปริมาตรทั้งหมดที่ค่ามุมข้อเหวี่ยงต่างๆ (ต่อ)

340	108.7169	7.1387	35.6923
350	111.5223	6.9394	35.5584
360	114.0651	6.8722	35.4203



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในเครื่องยนต์ และปริมาตรขยาย



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในเครื่องยนต์ และปริมาตรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- งานที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลทำงาน (W_E) สามารถหาได้จากสมการ

$$W_E = \oint PdV_E = \frac{P_{mean} V_{SD} \pi \lambda \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - \lambda^2}} \quad (18)$$

$$= \left(\frac{(101.3 \times 10^3 \text{ Pa})(8.8357 \text{ cm}^3) \times \pi \times 0.1617 \times \sin(40.4194^\circ)}{1 + \sqrt{1 - (0.1617)^2}} \right)$$

$$= 14.8380 \times 10^{-2} \text{ J}$$

- งานที่เกิดจากการอัดตัวของของไหลทำงาน (W_C) สามารถหาได้จากสมการ

$$W_C = \oint PdV_C = -\frac{P_{mean} V_{SD} \pi \lambda \gamma \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - \lambda^2}} \quad (19)$$

$$= -\left(\frac{(101.3 \times 10^3 \text{ Pa})(8.8357 \text{ cm}^3) \times \pi \times 0.1617 \times 0.5969 \times \sin(40.4194^\circ)}{1 + \sqrt{1 - (0.1617)^2}} \right)$$

$$= -8.8568 \times 10^{-2} \text{ J}$$

- งานในหนึ่งรอบวัฏจักร (W_i) สามารถหาได้จากสมการ

$$W_i = W_E + W_C \quad (20)$$

$$= (14.8380 \times 10^{-2}) + (-8.8568 \times 10^{-2})$$

$$= 5.9812 \times 10^{-2} \text{ J}$$

- หากำลังขาออกของเครื่องยนต์ (P_i) หาได้จากสมการพิจารณาที่รอบการทำงานของเครื่องยนต์ที่ 450 รอบต่อนาที

$$P_i = W_i \times N \quad (21)$$

$$= \frac{(7.1646 \times 10^{-3} \text{ J})(450 \text{ RPM})}{60 \text{ s}}$$

$$= 0.5373 \text{ W}$$

ดังนั้นกำลังขาออกของเครื่องยนต์มีค่าเท่ากับ 537.3 mW

- ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ (η) สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{W_i}{W_E} \times 100\% \quad (22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{5.9812 \times 10^{-2} J}{14.8380 \times 10^{-2} J} \times 100\%$$

$$= 40.3100\%$$

- แรงที่เกิดจากการเคลื่อนของลูกสูบและแรงบิดกับมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ความเร็วรอบที่ 450 RPM นำมาคำนวณหาแรงที่กระทำต่อลูกสูบได้ดังนี้

$$F_I = m_p \omega_c^2 r_p \cos \theta + \frac{m_p \omega_c^2 r_p \cos 2\theta}{n} \quad (23)$$

$$n = \frac{l_p}{r_p} = \frac{4.50 \text{ cm}}{0.90 \text{ cm}} = 5$$

$$F_I = (0.0076 \text{ kg}) \left(2\pi \frac{450}{60} \right)^2 (0.009 \text{ m}) \cos(10) + \frac{(0.0076 \text{ kg}) \left(2\pi \frac{450}{60} \right)^2 (0.009 \text{ m}) \cos(10)}{5}$$

$$F_I = 0.1785 \text{ N}$$

เมื่อ l_p คือ ระยะแกนชักของลูกสูบกำลัง, r_p คือ รัศมีข้อเหวี่ยง

- คำนวณหาแรงบิดที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$\tau = r_p F_I \left(\sin \theta + \frac{\sin 2\theta}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right) \quad (24)$$

$$\tau = (0.009 \text{ m}) (0.1785 \text{ N}) \left(\sin(10) + \frac{\sin 2(10)}{2\sqrt{(5)^2 - \sin^2(10)}} \right)$$

$$\tau = 0.3338 \text{ N-mm}$$

นำสมการที่ (23) และ (24) มาคำนวณที่มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตั้งแต่ 0-360 องศา จะได้ค่าดังตารางที่ 4.4

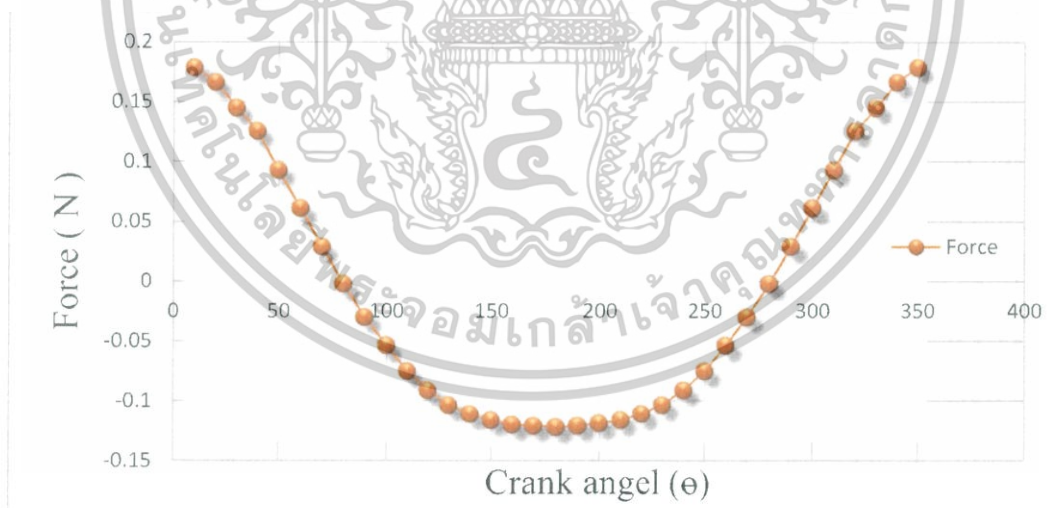
ตารางที่ 4.4 แรงที่เกิดจากการเคลื่อนของลูกสูบและแรงบิดกับมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 450RPM

Crank angle (degree)	Force (N)	Torque (N-mm)	Crank angle (degree)	Force (N)	Torque (N-mm)
0	0.1862	0.0000	190	-0.1205	0.1506
10	0.1785	0.3338	200	-0.1187	0.2956
20	0.1663	0.6070	210	-0.1160	0.4327
30	0.1450	0.7656	220	-0.1107	0.5413
40	0.1253	0.8495	230	-0.1033	0.6188
50	0.0927	0.7221	240	-0.0910	0.6370

ตารางที่ 4.4 แรงที่เกิดจากการเคลื่อนของลูกสูบและแรงบิดกับมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 450RPM (ต่อ)

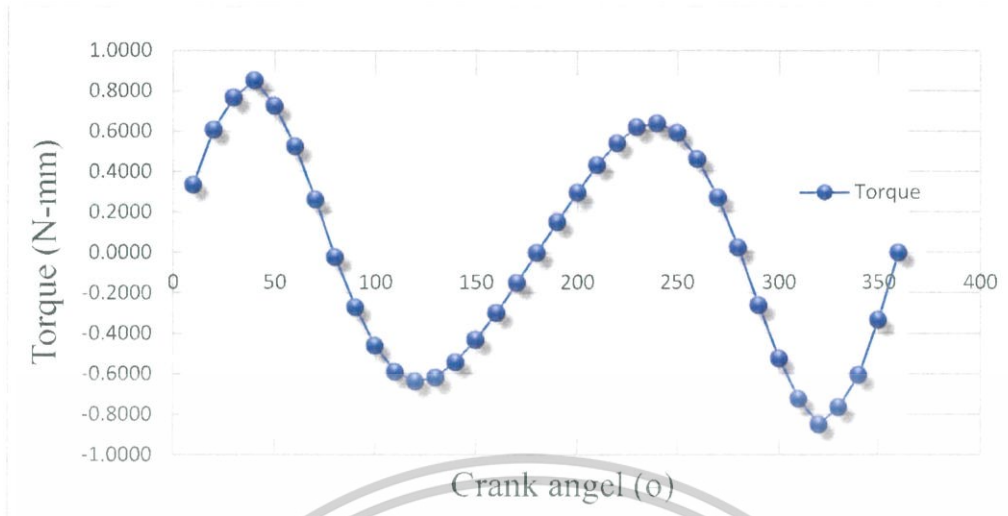
60	0.0609	0.5225	250	-0.0753	0.5919
70	0.0287	0.2597	260	-0.0540	0.4612
80	-0.0025	-0.0229	270	-0.0300	0.2700
90	-0.0300	-0.2700	280	-0.0025	0.0229
100	-0.0540	-0.4612	290	0.0287	-0.2597
110	-0.0753	-0.5919	300	0.0610	-0.5234
120	-0.0910	-0.6370	310	0.0927	-0.7221
130	-0.1033	-0.6188	320	0.1253	-0.8495
140	-0.1107	-0.5413	330	0.1450	-0.7656
150	-0.1160	-0.4327	340	0.1663	-0.6070
160	-0.1197	-0.2981	350	0.1785	-0.3338
170	-0.1205	-0.1506	360	0.1862	0.0000
180	-0.1220	0.0000	-	-	-

เมื่อนำผลจากตารางที่ 4.4 มาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงกับแรง จะได้กราฟดังรูปที่ 4.7 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงกับแรงบิด จะได้กราฟดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงกับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

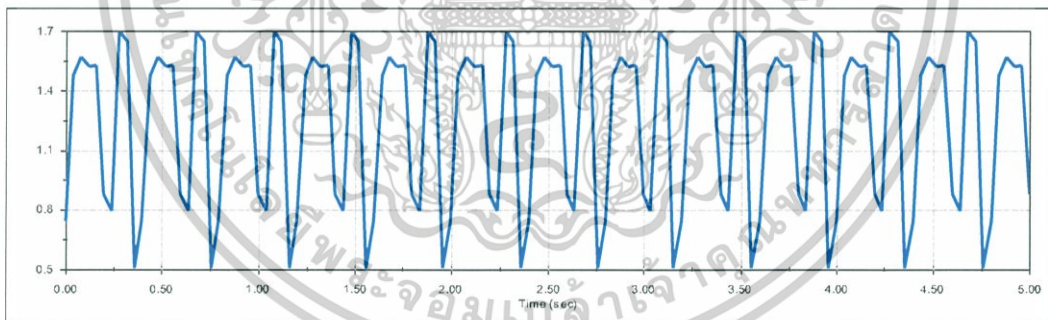


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงกับแรงบิด

4.2 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ในการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาแรงบิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

- ที่ความเร็วรอบ 450RPM



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงว่าสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และเวลา ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์

จาก

$$\tau = F \times R \quad ; R = 9\text{mm}$$

$$1.7\text{N} \cdot \text{mm} = F \times 9\text{mm}.$$

$$F = 0.189\text{N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเร็วรอบ 450RPM เมื่อคำนวณค่าแรง (F) มีค่าเท่ากับ 0.189N และการคำนวณแรง (F) ดังสมการที่ (23) มีค่า 0.179N ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการคำนวณ และการวิเคราะห์จากโปรแกรม Solidworks จะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน

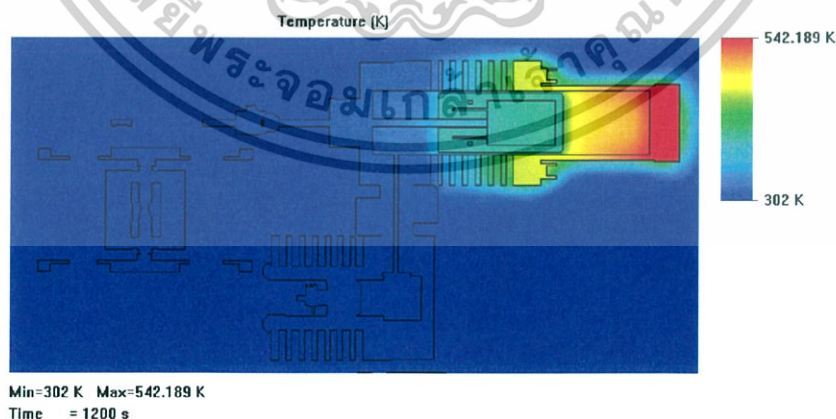
4.3 การวิเคราะห์การไหลของของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์

เพื่อทดสอบหาอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากการ Flow simulation โดยกำหนดของไหลของความร้อนภายในเครื่องยนต์เป็นเวลา 1200วินาที โดยมีเงื่อนไขดังตารางที่ 4.5 จะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขของการ Flow simulation

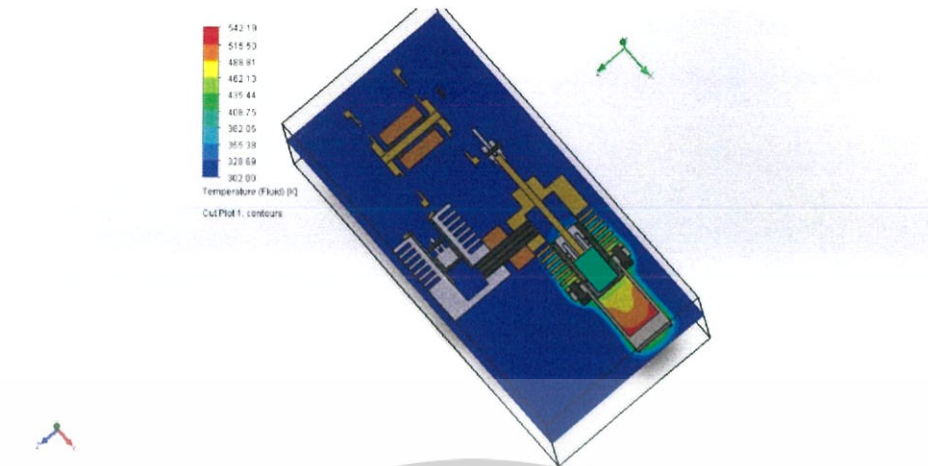
ชนิด	ลักษณะ	ชนิด	ลักษณะ
External flow	Laminar and turbulence	Working fluid	Air
Initial solid temperature	302.00 K	Materials	Aluminum, brass, stainless steel, glass and wood
Ambient temperature	302.00 K	Mean pressure	101.32 kPa
Mesh size	1 mm x 1mm	Gravity force	101.32 kPa
Heat conduction in solid	Time dependent	Turbulent intensity	0.10 %

เมื่อกำหนดเงื่อนไขการ Flow simulation ดังตารางที่4. จะได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้



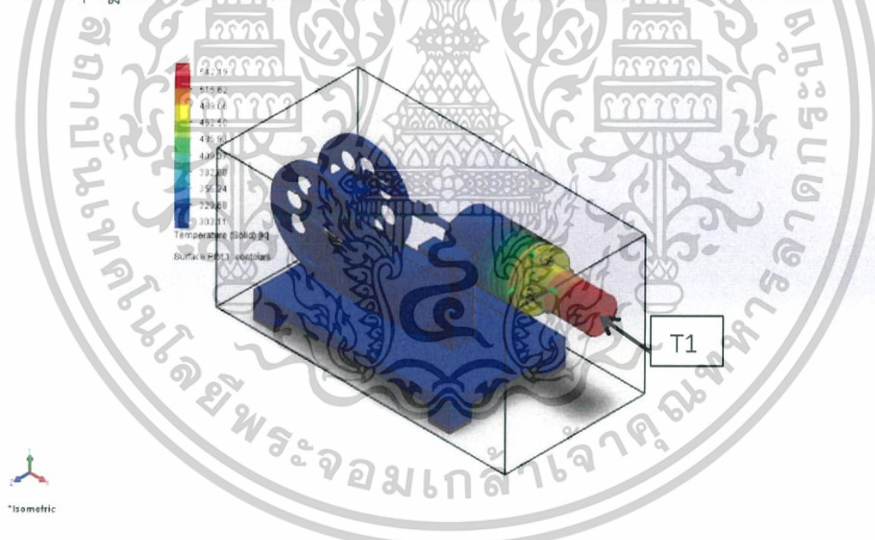
รูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์การไหลจากหน้าต่างโปรแกรม Solidworks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงอุณหภูมิของไหลทำงานภายในกระบอกสูบ

โดยจากรูปที่ 4.11 เป็นการแสดงผลการจำลองการไหลของความร้อนภายในเครื่องยนต์ แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิของไหลสูงสุดอยู่ที่ 542K เป็นอุณหภูมิมากพอที่จะทำให้ลูกสูบเกิดการเคลื่อนที่ และจะเห็นว่ากระบอกสูบกำลังมีของไหลเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ 302 K ดังนั้นเครื่องยนต์มีอุณหภูมิแตกต่างกันตามหลักทฤษฎีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ที่พอจะสามารถทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้



รูปที่ 4.12 แสดงอุณหภูมิของของแข็งเมื่อได้รับความร้อนจากการจุดฉนวน

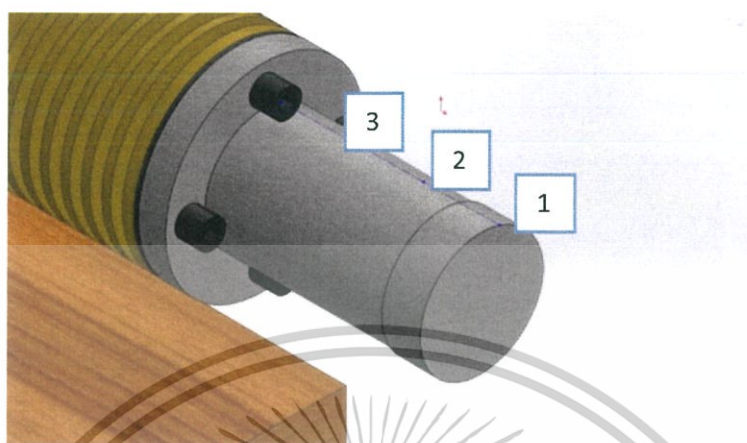
โดยจากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงความร้อนภายในของแข็ง โดยอุณหภูมิ T1 เปรียบเสมือนอุณหภูมิที่ได้จากการจุดฉนวน โดยความร้อนจะส่งผ่านของแข็งต่างชนิดกัน ทำให้กันอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์จะยังคงมีความร้อนที่ส่งมาจากการจุดฉนวน แต่สำหรับกระบอกสูบกำลังจะไม่ได้รับ หรือรับความร้อนจากการจุดฉนวนน้อย ทำให้กระบอกสูบทั้งสองมีความต่างอุณหภูมิ พอจะสามารถทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้

จากนั้นทำการพิจารณาความร้อนจากการจุดฉนวนที่เวลาต่างๆ 1200 วินาที time step 10 วินาที ที่จุดต่างๆ 3 จุด เพื่อดูประสิทธิภาพทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ผลแสดงดังหัวข้อเอกสารประกอบเอกสารที่ส่งงานเวลาสำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ที่ 4.3.1 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ความร้อน

พิจารณาจากตำแหน่งที่เริ่มสัมผัสความร้อนเป็นจำนวน 3 จุด



รูปที่ 4.13 แสดงจุดอ้างอิงทั้งสามภายในระบบปิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 1

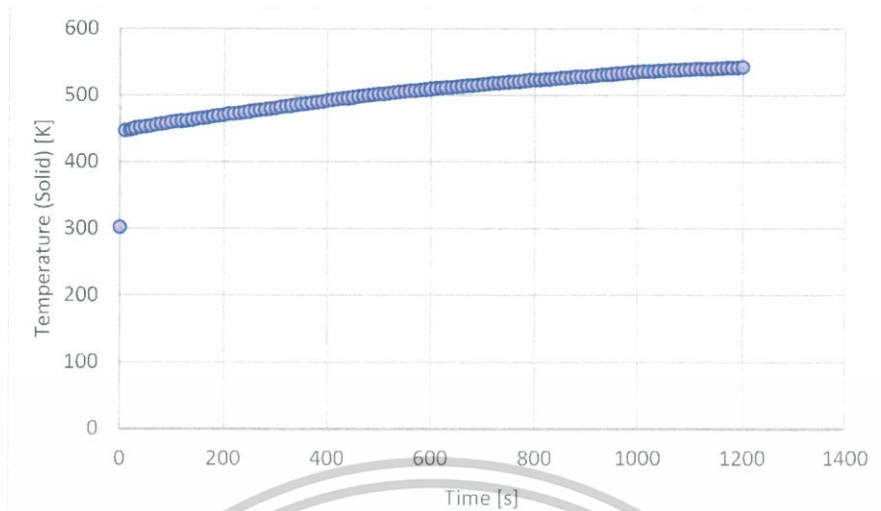
Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]
0	302	410	492.7761	820	523.8771
10	446.4574	420	493.6766	830	524.3775
20	447.7669	430	494.6762	840	524.9768
30	450.4537	440	495.5766	850	525.4776
40	451.6632	450	496.6759	860	525.9772
50	452.9647	460	497.6763	870	526.5774
60	454.2661	470	498.776	880	527.2766
70	455.4675	480	499.876	890	527.6779
80	456.7683	490	500.677	900	528.0777
90	457.9695	500	501.3775	910	528.5771
100	459.1681	510	502.1775	920	529.2769
110	460.4686	520	503.076	930	529.9764
120	461.0227	530	503.8766	940	530.5772
130	461.5742	540	504.5772	950	531.1768
140	462.7717	550	505.2775	960	531.7764
150	464.7704	560	505.9778	970	532.4766
160	465.275	570	506.5773	980	533.1761
170	466.4733	580	507.2773	990	533.8766
180	467.7737	590	507.9777	1000	534.5761
190	469.172	600	508.8761	1010	535.0764

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 1 (ต่อ)

Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]
200	470.2746	610	509.6768	1020	535.2778
210	471.5734	620	510.4772	1030	535.5774
220	472.176	630	511.1767	1040	535.9775
230	472.7764	640	511.8771	1050	536.3773
240	474.0742	650	512.4778	1060	536.8767
250	475.3747	660	513.1768	1070	537.2774
260	476.5755	670	513.8772	1080	537.6772
270	477.6765	680	514.4779	1090	538.1767
280	478.6757	690	515.0773	1100	538.6771
290	479.876	700	515.8772	1110	539.0772
300	480.9753	710	516.6764	1120	539.2777
310	481.9768	720	517.4768	1130	539.4776
320	483.0758	730	518.276	1140	539.5782
330	484.1752	740	518.8772	1150	539.8776
340	485.3763	750	519.4776	1160	540.2771
350	486.476	760	520.0771	1170	540.5773
360	487.4759	770	520.5778	1180	540.9774
370	488.4756	780	521.177	1190	541.3772
380	489.5767	790	522.1763	1200	542.0759
390	490.5767	800	522.7768	-	-
400	491.6762	810	523.3772	-	-

จากข้อมูลตารางที่ 4.6 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของจุดอ้างอิงที่ 1 กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 1

- จุดที่ 2

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 2

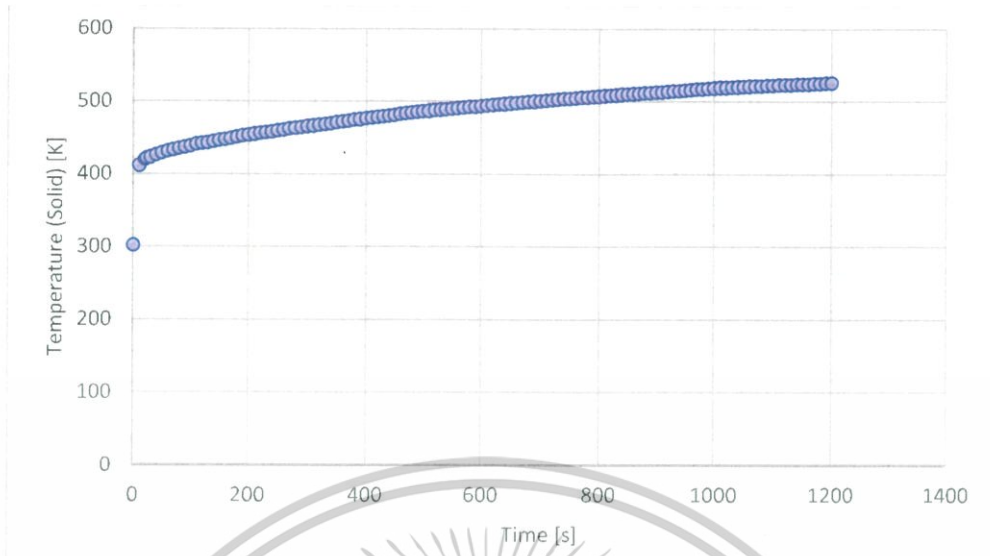
Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]
0	302	410	477.3389	820	508.1966
10	411.7614	420	478.3042	830	508.7045
20	420.3122	430	479.2818	840	509.2644
30	423.276	440	480.2142	850	509.7855
40	426.5443	450	481.2373	860	510.2867
50	428.9933	460	482.2392	870	510.841
60	431.2372	470	483.2796	880	511.4707
70	433.3017	480	484.3365	890	511.9523
80	435.3041	490	485.2234	900	511.4707
90	437.1856	500	485.9895	910	511.9523
100	438.9771	510	486.7794	920	513.445
110	440.7596	520	487.639	930	514.0888
120	442.0802	530	488.4607	940	514.6819
130	443.1958	540	489.2047	950	515.2553
140	444.612	550	489.9223	960	515.826
150	446.5701	560	490.6339	970	516.4531
160	447.8229	570	491.2839	980	517.1012
170	449.1578	580	491.9666	990	517.7523

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 2 (ต่อ)

Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]
180	450.6285	590	492.6636	1000	518.4043
190	452.1629	600	493.4734	1010	518.9433
200	453.5307	610	494.2666	1020	519.2708
210	454.9336	620	495.0431	1030	519.5852
220	455.954	630	495.7603	1040	519.9651
230	456.8146	640	496.4551	1050	520.363
240	458.0351	650	497.0883	1060	520.8183
250	459.3791	660	497.7545	1070	521.2367
260	460.6714	670	498.4366	1080	521.6366
270	461.8787	680	499.0618	1090	522.0898
280	462.9966	690	499.665	1100	522.5621
290	464.1944	700	500.3773	1110	522.9783
300	465.3636	710	501.1285	1120	523.2619
310	466.4522	720	501.885	1130	523.4993
320	467.5666	730	502.6424	1140	523.6718
330	468.6911	740	503.2865	1150	523.9329
340	469.8679	750	503.8884	1160	524.287
350	471.0031	760	504.4828	1170	524.6078
360	472.0578	770	505.0177	1180	524.9677
370	473.0843	780	505.5864	1190	525.3453
380	474.1591	790	506.3987	1200	525.8953
390	475.1915	800	507.0675		
400	476.2579	810	507.6654		

จากข้อมูลตารางที่ 4.7 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของจุดอ้างอิงที่ 2 กับ เวลา แสดงดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 2

จุดที่ 3

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 3

Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]
0	302	410	424.3570555	820	508.1966
10	311.7536015	420	425.3823857	830	508.7045
20	322.3167268	430	426.3809884	840	509.2644
30	393.1593254	440	427.3595251	850	455.9631194
40	395.2426881	450	428.3191285	860	456.4726921
50	397.2255568	460	429.2721778	870	456.9747933
60	399.1111178	470	430.2127993	880	457.4722778
70	400.8626191	480	431.1475202	890	457.9744181
80	402.5199777	490	432.0700023	900	458.4560332
90	404.1391556	500	432.9557012	910	458.9213095
100	405.7136843	510	433.8112624	920	459.3893073
110	407.2364406	520	434.6552217	930	459.8690149
120	408.6927269	530	435.4864427	940	460.350969
130	410.101054	540	436.2971883	950	460.8314301
140	411.4710339	550	437.0845277	960	461.3081618
150	331.2716931	560	437.8499783	970	461.7837734
160	338.2414165	570	438.5961747	980	462.2692827
170	344.4037202	580	439.3206355	990	462.7611031

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้ใช้เฉพาะงานวิจัยภายในของภาควิชาวิศวกรรมโยธา ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากผู้อำนวยการ

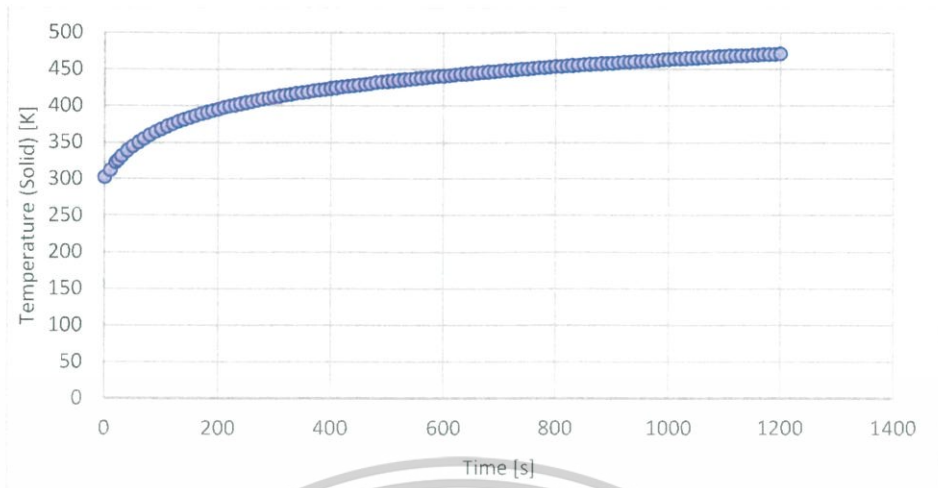
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 3 (ต่อ)

Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]	Time [s]	Temperature (Solid) [K]
180	349.9703382	590	440.0353131	1000	463.2513693
190	355.0442159	600	440.7412592	1010	463.7415651
200	359.6892337	610	441.452793	1020	464.2127816
210	363.9674978	620	442.1536399	1030	464.6496626
220	367.9148352	630	442.8489237	1040	465.0692819
230	371.5753718	640	443.5277945	1050	465.4821361
240	374.9655038	650	444.1931281	1060	465.8902918
250	378.0679226	660	444.8431909	1070	466.297185
260	380.9420108	670	445.4842686	1080	466.6940858
270	383.6735411	680	446.1180644	1090	467.0867901
280	386.282932	690	446.7319638	1100	467.4844493
290	388.6875098	700	447.3443055	1110	467.8776716
300	390.9749247	710	447.9588969	1120	468.2573976
310	412.7982917	720	448.5806569	1130	464.6496626
320	414.0832657	730	449.1980264	1140	465.0692819
330	415.3331074	740	449.8157003	1150	465.4821361
340	416.5569835	750	450.4147118	1160	464.6496626
350	417.7568315	760	450.9981241	1170	469.9030495
360	418.9240353	770	451.5718465	1180	470.2161874
370	420.0591834	780	452.1276073	1190	470.5322715
380	421.1679112	790	452.6906731	1200	470.8555307
390	422.2474399	800	453.2679598		
400	423.3126203	810	453.834135		

จากข้อมูลตารางที่ 4.8 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของจุดอ้างอิงที่ 3 กับ เวลา แสดงดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



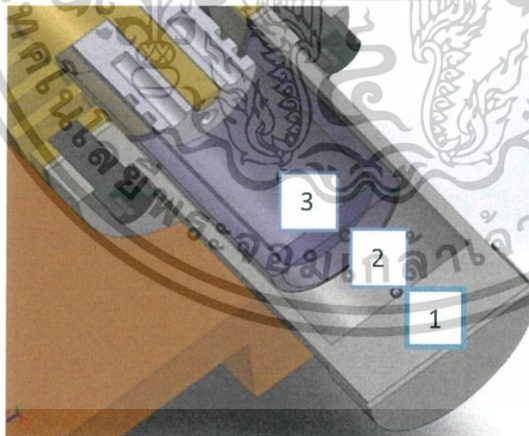
รูปที่ 4.16 แสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 3

ดังนั้นจากรูปที่ 4.14 4.15 และ 4.16 จึงสามารถสรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิกับเวลาว่ามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น

จากนั้นทำการพิจารณาความร้อนจากของไหลภายในที่เวลาต่างๆ 1200 วินาที time step 10 วินาที ที่จุดต่างๆ 3 จุด เพื่อดูความดันภายในกระบอกสูบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ผลแสดงดังหัวข้อที่ 4.3.2

4.3.2 ความดัน

พิจารณาจากตำแหน่งภายใน บริเวณปลายกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ 3 จุด



รูปที่ 4.17 แสดงจุดอ้างอิงทั้งสามภายในระบบปิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 1

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 1

Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]
0	101323.535	410	120815.6434	820	127541.3014
10	108234.8245	420	121030.4203	830	127678.7169
20	109300.5542	430	121183.2883	840	127797.6331
30	110797.8954	440	121390.2865	850	127922.3891
40	111241.2187	450	121640.5466	860	128028.8827
50	111618.8246	460	121844.1195	870	128162.1296
60	111972.1262	470	122005.0682	880	128286.5731
70	112304.301	480	122204.2632	890	128396.9431
80	112626.0073	490	122425.3817	900	128513.3754
90	112934.51	500	122605.5137	910	128626.5742
100	113234.1811	510	122792.5444	920	128746.0041
110	113541.1558	520	122936.6381	930	128873.0603
120	113810.3961	530	123126.1497	940	128970.8785
130	114066.2486	540	123350.0752	950	129074.1689
140	114310.9249	550	123519.9835	960	129191.9749
150	114623.8855	560	123673.3902	970	129329.1654
160	114886.3712	570	123833.0254	980	129416.6673
170	115125.5067	580	123996.5103	990	129552.5396
180	115394.4062	590	124171.3905	1000	129660.1534
190	115646.5929	600	124347.6074	1010	129774.1613
200	115942.523	610	124515.6113	1020	129885.5972
210	116167.7821	620	124660.6403	1030	129956.9487
220	116447.9026	630	124841.1273	1040	130072.9904
230	116637.8472	640	124997.3513	1050	130166.3436
240	116921.0717	650	125134.438	1060	130267.1434
250	117137.158	660	125319.4994	1070	130365.5967
260	117411.9432	670	125466.3735	1080	130447.244
270	117647.3528	680	125605.8435	1090	130551.0031
280	117895.5848	690	125724.6699	1100	130650.1032
290	118124.3509	700	125882.7288	1110	130737.7026
300	118331.9798	710	126033.0901	1120	130821.5043

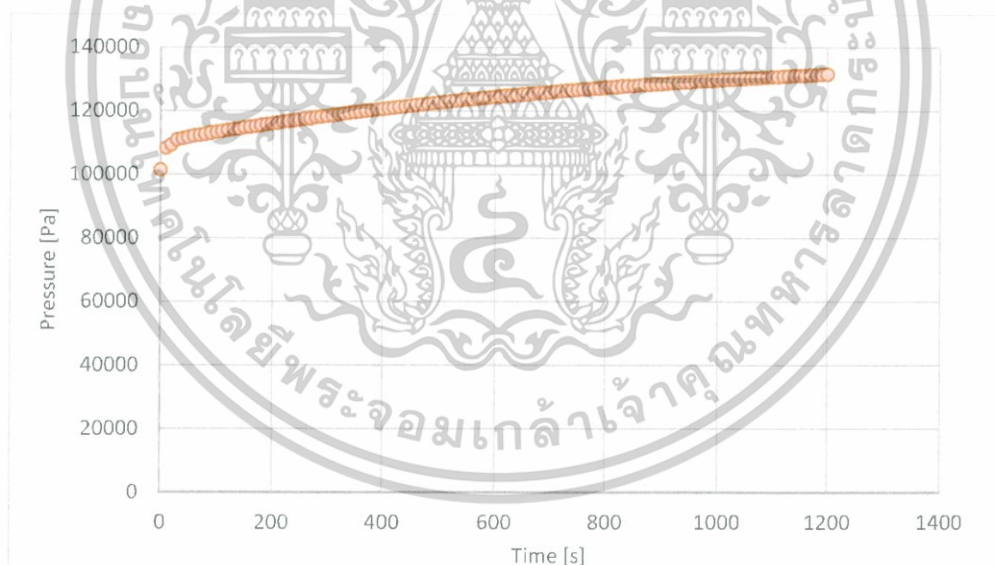
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ หงสสิน อักหงหามมโหดดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหมการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 1 (ต่อ)

Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]
310	118581.5766	720	126191.4455	1130	130908.0848
320	118793.8205	730	126330.197	1140	130986.556
330	119052.1751	740	126470.9627	1150	131078.4775
340	119260.8442	750	126617.5513	1160	131149.1332
350	119474.6392	760	126752.8471	1170	131223.2828
360	119732.7373	770	126879.2564	1180	131317.4647
370	119955.2764	780	127002.8278	1190	131400.0955
380	120150.726	790	127162.5751	1200	131493.7195
390	120355.343	800	127290.8672		
400	120558.7808	810	127416.2616		

จากข้อมูลตารางที่ 4.9 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันของจุดอ้างอิงที่ 1 กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 2

ตาราง 4.10 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 2

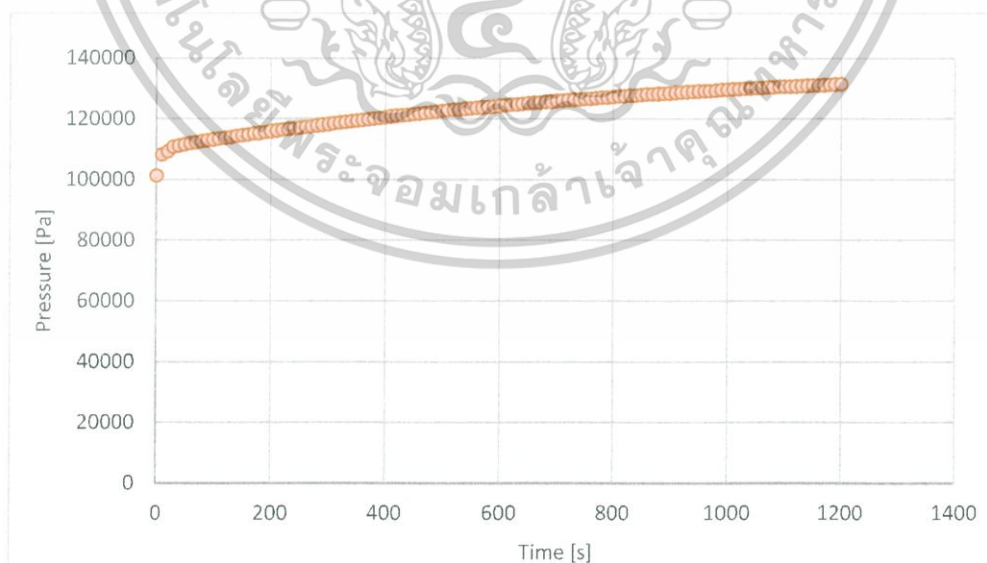
Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]
0	101323.535	410	120815.6434	820	127541.3014
10	108234.8245	420	121030.4203	830	127678.7169
20	109300.5542	430	121183.2883	840	127797.6331
30	110797.8954	440	121390.2865	850	127922.3891
40	111241.2187	450	121640.5466	860	128028.8827
50	111618.8246	460	121844.1195	870	128162.1296
60	111972.1262	470	122005.0682	880	128286.5731
70	112304.301	480	122204.2632	890	128396.9431
80	112626.0073	490	122425.3817	900	128513.3754
90	112934.51	500	122605.5137	910	128626.5742
100	113234.1811	510	122792.5444	920	128746.0041
110	113541.1558	520	122936.6381	930	128873.0603
120	113810.3961	530	123126.1497	940	128970.8785
130	114066.2486	540	123350.0752	950	129074.1689
140	114310.9249	550	123519.9835	960	129191.9749
150	114623.8855	560	123673.3902	970	129329.1654
160	114886.3712	570	123833.0254	980	129416.6673
170	115125.5067	580	123996.5103	990	129552.5396
180	115394.4062	590	124171.3905	1000	129660.1534
190	115646.5929	600	124347.6074	1010	129774.1613
200	115942.523	610	124515.6113	1020	129885.5972
210	116167.7821	620	124660.6403	1030	129956.9487
220	116447.9026	630	124841.1273	1040	130072.9904
230	116637.8472	640	124997.3513	1050	130166.3436
240	116921.0717	650	125134.438	1060	130267.1434
250	117137.158	660	125319.4994	1070	130365.5967
260	117411.9432	670	125466.3735	1080	130447.244
270	117647.3528	680	125605.8435	1090	130551.0031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.10 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 2 (ต่อ)

Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]
280	117895.5848	690	125724.6699	1100	130650.1032
290	118124.3509	700	125882.7288	1110	130737.7026
300	118331.9798	710	126033.0901	1120	130821.5043
310	118581.5766	720	126191.4455	1130	130908.0848
320	118793.8205	730	126330.197	1140	130986.556
330	119052.1751	740	126470.9627	1150	131078.4775
340	119260.8442	750	126617.5513	1160	131149.1332
350	119474.6392	760	126752.8471	1170	131223.2828
360	119732.7373	770	126879.2564	1180	131317.4647
370	119955.2764	780	127002.8278	1190	131400.0955
380	120150.726	790	127162.5751	1200	131493.7195
390	120355.343	800	127290.8672		
400	120558.7808	810	127416.2616		

จากข้อมูลตารางที่ 4.10 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันของจุดอ้างอิงที่ 2 กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 3

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 3

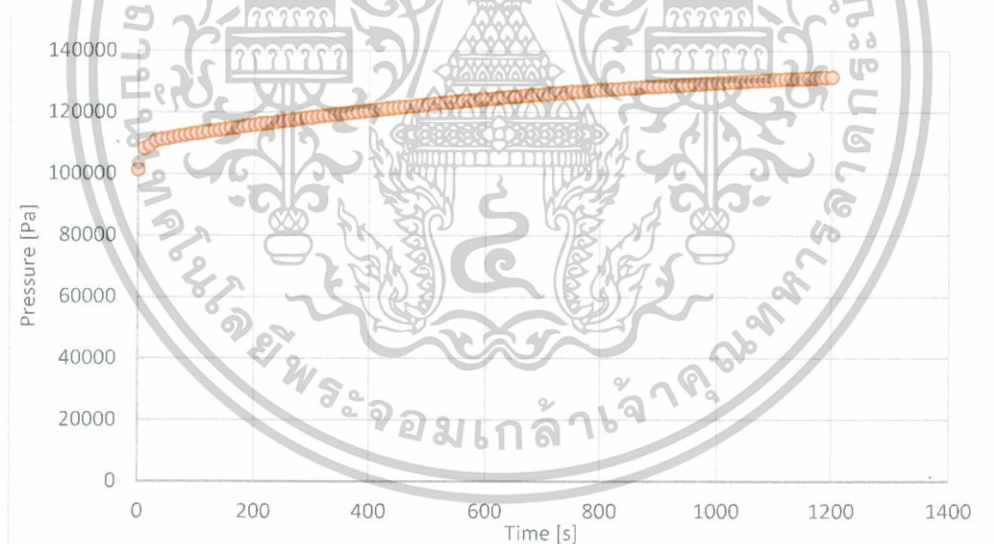
Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]
0	101323.535	410	120815.6434	820	127541.3014
10	108234.8245	420	121030.4203	830	127678.7169
20	109300.5542	430	121183.2883	840	127797.6331
30	110797.8954	440	121390.2865	850	127922.3891
40	111241.2187	450	121640.5466	860	128028.8827
50	111618.8246	460	121844.1195	870	128162.1296
60	111972.1262	470	122005.0682	880	128286.5731
70	112304.301	480	122204.2632	890	128396.9431
80	112626.0073	490	122425.3817	900	128513.3754
90	112934.51	500	122605.5137	910	128626.5742
100	113234.1811	510	122792.5444	920	128746.0041
110	113541.1558	520	122936.6381	930	128873.0603
120	113810.3961	530	123126.1497	940	128970.8785
130	114066.2486	540	123350.0752	950	129074.1689
140	114310.9249	550	123519.9835	960	129191.9749
150	114623.8855	560	123673.3902	970	129329.1654
160	114886.3712	570	123833.0254	980	129416.6673
170	115125.5067	580	123996.5103	990	129552.5396
180	115394.4062	590	124171.3905	1000	129660.1534
190	115646.5929	600	124347.6074	1010	129774.1613
200	115942.523	610	124515.6113	1020	129885.5972
210	116167.7821	620	124660.6403	1030	129956.9487
220	116447.9026	630	124841.1273	1040	130072.9904
230	116637.8472	640	124997.3513	1050	130166.3436
240	116921.0717	650	125134.438	1060	130267.1434
250	117137.158	660	125319.4994	1070	130365.5967
260	117411.9432	670	125466.3735	1080	130447.244
270	117647.3528	680	125605.8435	1090	130551.0031
280	117895.5848	690	125724.6699	1100	130650.1032
290	118124.3509	700	125882.7288	1110	130737.7026
300	118331.9798	710	126033.0901	1120	130821.5043

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ไม่ใช่จุดประสงค์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณิดำเนินการใดๆ ทั้งสิ้น

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ ของจุดอ้างอิงที่ 3 (ต่อ)

Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]	Time [s]	Pressure [Pa]
310	118581.5766	720	126191.4455	1130	130908.0848
320	118793.8205	730	126330.197	1140	130986.556
330	119052.1751	740	126470.9627	1150	131078.4775
340	119260.8442	750	126617.5513	1160	131149.1332
350	119474.6392	760	126752.8471	1170	131223.2828
360	119732.7373	770	126879.2564	1180	131317.4647
370	119955.2764	780	127002.8278	1190	131400.0955
380	120150.726	790	127162.5751	1200	131493.7195
390	120355.343	800	127290.8672		
400	120558.7808	810	127416.2616		

จากข้อมูลตารางที่ 4.11 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันของจุดอ้างอิงที่ 3 กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงค่าความดันที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่จุดอ้างอิงที่ 3

ดังนั้นจากรูปที่ 4.18 4.19 และ 4.20 จึงสามารถสรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันกับเวลาว่ามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงเวลาที่ 1200 วินาทีเป็นต้นไป ซึ่งค่าความดันมีแนวโน้มคงที่ไม่มีการเพิ่มขึ้นตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

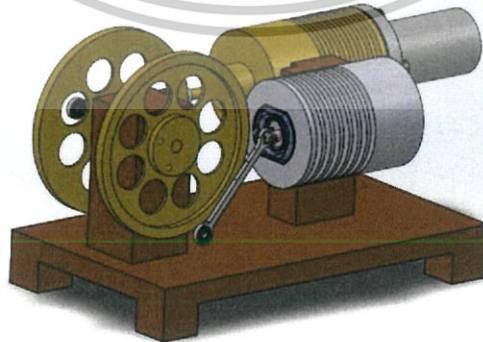
4.4 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อประกอบระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ในการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์อยู่ สอง ชนิดคือปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมภายนอกของเครื่องยนต์ และปัจจัยด้านประสิทธิภาพของชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ โดยในหัวข้อนี้จะให้ความสนใจการทดสอบประสิทธิภาพของปัจจัยที่สอง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ต้องทำการทดสอบก่อนการประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อทำการทดสอบหาประสิทธิภาพจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบว่าส่วนประกอบชิ้นต่างๆของระบบเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพในระดับที่จะสามารถนำมาใช้งานได้หรือไม่

4.3.1 การรั่วไหลของระบบ

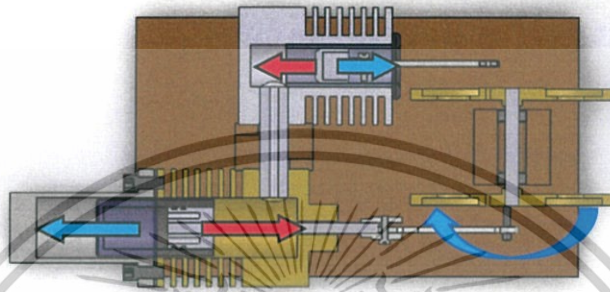
การตรวจสอบหาการรั่วของระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นเนื่องด้วยหากระบบมีการรั่วจะส่งผลให้การทำงานของเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพที่ต่ำเพราะจะเกิดการสูญเสียความดันจากการที่อากาศภายในกระบอกสูบเกิดการรั่วไหลออกจากระบบในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ไล่อากาศไปยังกระบอกสูบอีกฝั่ง โดยในการตรวจสอบเริ่มจากการประกอบชิ้นส่วนทุกชิ้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 4.21 แล้วทำการปลดข้อเหวี่ยงที่เชื่อมต่อระหว่างล้อเกียร์กระตุ้นกำลังกับลูกสูบกำลังออก ในขณะที่ชิ้นส่วนอื่นยังคงประกอบเข้าที่ ดังรูปที่ 4.22

รูปที่ 4.21 แสดงการประกอบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทุกชิ้นส่วน

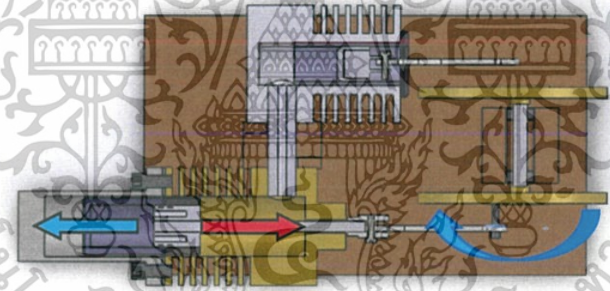


รูปที่ 4.22 แสดงการปลดข้อเหวี่ยงที่เชื่อมต่อระหว่างล้อเกียร์กระตุ้นกำลังและลูกสูบกำลัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น, ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ออกในขณะที่ชิ้นส่วนอื่นยังคงประกอบเข้าที่อยู่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการหมุนล้อเกียร์กระตุนกำลังเพื่อดูพฤติกรรมของลูกสูบกำลัง โดยอาศัยหลักการที่ว่า การหมุนล้อเกียร์กระตุนกำลังนั้นจะส่งผลให้ลูกสูบดีสเพลสเซอร์ไต่อากาศจากภายในกระบอกสูบดีสเพลสเซอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังกระบอกสูบกกำลังและดันให้ลูกสูบกำลังเกิดการเคลื่อนที่โดยหากว่าลูกสูบกำลังเกิดการเคลื่อนที่ที่จะเป็นการแสดงว่าระบบไม่มีการรั่วซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.23 แต่หากลูกสูบกำลังไม่มีการเคลื่อนที่ที่จะเป็นการแสดงว่าระบบเกิดการรั่วซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 แสดงการทดลองหมุนล้อเกียร์กระตุนกำลังที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับลูกสูบกำลังซึ่งพบว่าลูกสูบกำลังมีการเคลื่อนที่ซึ่งแสดงว่าระบบไม่เกิดการรั่ว

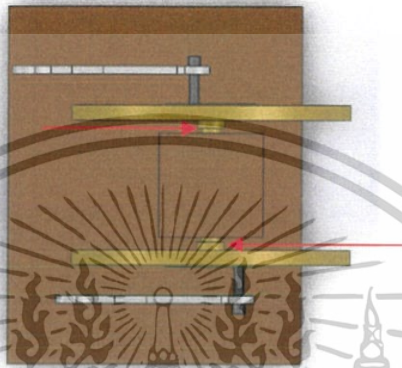


รูปที่ 4.24 แสดงการทดลองหมุนล้อเกียร์กระตุนกำลังที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับลูกสูบกำลังซึ่งพบว่าลูกสูบกำลังไม่เกิดการเคลื่อนที่ซึ่งแสดงว่าระบบเกิดการรั่ว

4.3.2 การทดสอบการตั้งล้อเกียร์กระตุนกำลัง

การกำหนดระยะห่างระหว่างล้อเกียร์กระตุนกำลังกับขอบของฐานไม้ ก็เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยหากล้อเกียร์ชิดกับขอบฐานไม้มากเกินไปจะส่งผลให้ในการหมุนของล้อเกียร์เกิดการเสียดสีกับขอบฐานไม้จึงเป็นการเพิ่มค่าแรงเสียดทานแต่หากระยะห่างดังกล่าวมากเกินไปจะส่งผลให้ล้อเกียร์เกิดการแกว่งขณะที่ระบบกำลังทำงาน โดยจะส่งผลให้ล้อเกียร์มีการหมุนที่ไม่สมดุล และระยะห่างของล้อเกียร์กระตุนกำลังทั้งสองข้างและขอบฐานไม้ทั้งสองข้างจำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ที่เท่ากันเพื่อให้ระบบทำงานภายในสมดุล โดยในการกำหนดระยะห่างระหว่างล้อเกียร์กระตุนกำลังกับฐานไม้ของระบบที่ใช้หลักการยึดกันด้วยระบบพิกัดเพื่อการสวมอัด จะกำหนดจากระยะห่างจากปลายของเพลาช่างนั้นๆกับผิวข้างของฐานไม้ ซึ่งกำหนดให้ค่าเท่ากับ 10 mm โดยในการประกอบจะเริ่มจากการประกอบฐานเข้ากับตลับลูกปืนแล้วไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

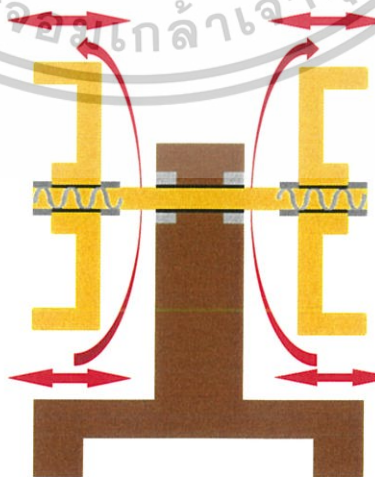
ทำการสวมอัดเพลลาเข้าไปยังรูในของตลับลูกปืนแล้วใช้ก้านวัดลิกของเวอร์เนียร์วัดระยะห่างระหว่างปลายของเพลลา กับขอบฐานไม้ โดยทำการวัดกับเพลลาและขอบฐานไม้ทั้งสองข้าง เพื่อดูว่ามีค่าเท่ากันหรือไม่ ซึ่งหากมีค่าไม่เท่ากัน จะทำการอัดเพลลาทางฝั่งที่สัดค่าได้มากที่สุดให้เคลื่อนเข้าไปยังรูในของตลับลูกปืนให้มากขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มระยะห่างระหว่างล้อเกียร์กับขอบฐานไม้ที่อีกฝั่งหนึ่ง และเป็นการลดระยะห่างระหว่างล้อเกียร์กับขอบฐานไม้ โดยเมื่อระยะห่างดังกล่าวได้ค่าเป็น 10 mm และมีค่าเท่ากันทั้งสองฝั่ง จะทำการอัดล้อเกียร์กระตุ้นกำลังเข้าไปที่บริเวณปลายทั้งสองช่องของเพลลา



รูปที่ 4.25 แสดงการกำหนดค่าระยะห่างระหว่างล้อเกียร์กระตุ้นกำลังและขอบฐานไม้ให้มีระยะเป็น 10 mm และทั้งสองข้างมีระยะห่างที่เท่ากัน

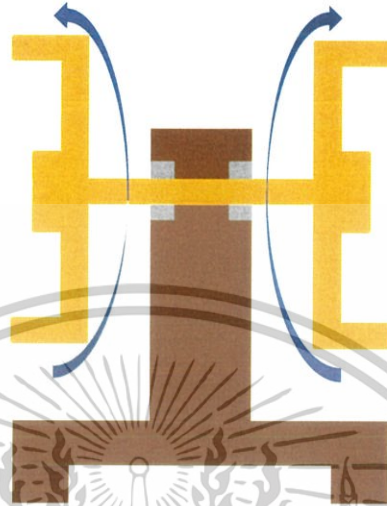
4.3.3 ผลของการยึดล้อเกียร์ด้วยหลักการพิคัดเฟื่องานสวมอัด

ผลของการเปลี่ยนวิธีการยึดล้อเกียร์กระตุ้นกำลังกับเพลลาด้วยเกลียวนอตซึ่งจะส่งผลให้จำเป็นต้องใช้เพลลาที่มีขนาดเล็กกว่ารูในของตลับลูกปืนไปเป็นการใช้หลักการพิคัดเฟื่องานสวมอัด ซึ่งจะยึดเพลลาเข้ากับล้อเกียร์กระตุ้นกำลังและตลับลูกปืนด้วยการใช้เพลลาที่มีขนาดใหญ่กว่ารูในของทั้งตลับลูกปืนและล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง ทำให้ได้ระบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังที่สามารถหมุนได้โดยไม่เกิดการแกว่งของล้อเกียร์ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้การทำงานของเครื่องยนต์เป็นไปอย่างไม่สมดุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.26 แสดงการทำงานของระบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังซึ่งยึดกับเพลาด้วยเกสียวโดยใช้เพลามีขนาดเล็กกว่าขนาดรูในของตลับลูกปืนซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแกว่งของระบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังซึ่งส่งผลให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานอยู่ในสภาวะที่ไม่สมดุล



รูปที่ 4.27 แสดงการยึดเพลากับล้อเกียร์กระตุ้นกำลังและรูในตลับลูกปืนด้วยหลักการพิคัดเพื่องานสวมอัด

จากรูป 4.27 แสดงการยึดเพลากับล้อเกียร์กระตุ้นกำลังและรูในตลับลูกปืนด้วยหลักการพิคัดเพื่องานสวมอัดซึ่งส่งผลให้การทำงานของระบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังสามารถทำงานได้โดยไม่เกิดการแกว่งและระบบสามารถทำงานได้ในสภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยเรื่องการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกวมมาด้วยหลักสมมูลของ ล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง โดยยึดหลักผลต่างอุณหภูมิของกระบอกสูบทั้งสองฝั่ง เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถ ทำงานได้ โดยกระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์จะทำจากทองเหลือง และกระบอกสูบกำลังทำจากอลูมิเนียม เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่างกัน จึงทำให้อุณหภูมิของกระบอกสูบทั้งสองแตกต่างกันชัดเจน และใช้หลักสวมอัดในการสวมเพลลาเข้ากับล้อเกียร์ จึงทำให้ลดการสั่นของล้อ เกียร์ และลดการสูญเสียกำลังของเครื่องยนต์

5.1.1 ผลการคำนวณ และการวัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

ปริมาตรตายของกระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์ (V_{DE}) มีค่า 6.8722 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรตายของกระบอกสูบลูกสูบกำลัง (V_{DC}) มีค่า 18.9171 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรกวาดของลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์ (V_{SD}) มีค่า 8.8357 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรกวาดของกระบอกสูบกำลัง (V_{SP}) มีค่า 3.1809 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรขยายของเครื่องยนต์ (V_E) มีค่า 6.8722 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรบีบอัดของเครื่องยนต์ (V_C) มีค่า 28.5480 ลูกบาศก์เซนติเมตร และปริมาตรทั้งหมดในเครื่องยนต์ (V) มีค่า 35.4202 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาตรและมุมข้อเหวี่ยง พบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิง มีปริมาตรขยายต่ำสุดที่มุม 0 องศา ปริมาตรบีบอัดต่ำสุดที่มุม 170 องศา และมีปริมาตรขยายสูงสุดที่มุม 180 องศา ปริมาตรบีบอัดสูงสุดที่มุม 350 องศา ดังนั้นปริมาตรบีบอัดมีเฟสนำปริมาตรขยายอยู่ 170 องศา ซึ่งถือว่าเยอะมาก เนื่องจากเครื่องยนต์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดควรมีเฟสต่างกัน 90 องศา แสดงว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในงานวิจัยนี้ยังทำงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุดไม่ได้

จากกราฟรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าปริมาตรบีบอัดมีค่าที่มากกว่าปริมาตรขยายจึงทำให้กราฟทั้งสองไม่ตัดกัน ซึ่งสาเหตุมาจากการออกแบบความยาวของลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์ที่น้อยไป ทำให้ปริมาตรบีบอัดมีค่ามากขึ้น ส่วนในรูปที่ 4.5 เห็นได้ว่าปริมาตรรวมต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่มุมข้อเหวี่ยงที่ 90 องศาและ 270 องศา ซึ่งเป็นมุมจุดตัดของปริมาตรขยายและปริมาตรบีบอัดที่เหมาะสม ซึ่งปริมาตรรวมสูงสุดของเครื่องยนต์อยู่ที่ 35.4202 cm^3

เครื่องยนต์จะมีประสิทธิภาพทางความร้อนที่ดี คือควรมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิของกระบอกสูบด้านเย็นและด้านร้อนมีค่ามากๆ โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรุ่นนี้มีค่าอัตราส่วนของอุณหภูมิ (γ) เท่ากับ 0.5696 และมีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ (η) เท่ากับ 40.31% ดังนั้นถ้าสามารถพัฒนาทำให้ค่าอัตราส่วนของอุณหภูมิมีค่ามากขึ้น ก็จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติการถ่ายโอนความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำกระบอกสูบด้วยเช่นกัน

5.1.2 ผลการวิเคราะห์แรงบิด และวิเคราะห์ของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์ จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(F) ดังสมการที่ (23) มีค่า 0.179N ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการคำนวณ และการวิเคราะห์จากโปรแกรม Solidworks จะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าผลการวิเคราะห์แรงบิดจากการ Simulation มีความถูกต้อง

จากการวิเคราะห์ของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์โดยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ จากการ Flow simulation พบว่าจากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เป็นการแสดงผลการ Flow simulation แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 542K เป็นอุณหภูมิมากพอที่จะทำให้ลูกสูบเกิดการเคลื่อนที่ และจะเห็นว่ากระบอกสูบกำลังมีค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ 302 K ดังนั้นเครื่องยนต์มีอุณหภูมิแตกต่างกันตามหลักทฤษฎีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ที่พอจะสามารถทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้

5.1.3 ผลการทดสอบเพื่อประกอบระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

จากการทดสอบประสิทธิภาพของส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพบว่าการรั่วของระบบปิดบริเวณฝาปิดกระบอกสูบทั้งกระบอกสูบกำลัง และกระบอกสูบติสเพลสเซอร์ จึงส่งผลให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สร้างขึ้นไม่ทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำงานและแก้ไขเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผู้จัดทำมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1. แก้ไขการรั่วของระบบ จากการทดสอบการรั่ว จะสามารถทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้
2. ออกแบบชิ้นส่วนให้เหมาะสมกับพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ ที่ได้คำนวณจากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิก
3. ใช้การวิเคราะห์จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่ละเอียดมากขึ้น เพื่อการสร้างเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] จีระศักดิ์ ตัญญาภักดิ์,อดิศร พูลสวัสดิ์ และอานนท์ พรหมแก้ว. “เครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบขนาดเล็ก ชนิดแกมมา”.(วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีลาดกระบัง,2554)
- [2] G, Walker, 1980 **Stirling Engine**. Oxford : Clarendon Press.
- Robert, Foster. Majid, Ghassemi. and Alma, Cota. 2010. **Solar Energy Renewable Energy and the Environment**. New York : CRC Press.
- [3] William R Martini, “Stirling engine design manual”.(University of Washington,1978)
- [4] Ohio University. 2010. **Gamma Type Stirling Engines**. [Online].
Available : <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/gamma.html>
- [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] Ohio University. 2010. **Ideal Adiabatic Analysis**. [Online].
Available : <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/adiabatic/adiabatic.html>
- [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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ELSEVIER

Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/energy

Many-objective thermodynamic optimization of Stirling heat engine

Vivek Patel^{*}, Vimal Savsani, Anurag Mudgal

Department of Mechanical Engineering, Pandit Deendayal Petroleum University, Gujarat, India

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 November 2016

Received in revised form

11 February 2017

Accepted 26 February 2017

Available online 28 February 2017

Keywords:

Stirling heat engine

Many-objective optimization

Thermal efficiency

Power output

Ecological function

Exergy efficiency

ABSTRACT

This paper presents a rigorous investigation of many-objective (four-objective) thermodynamic optimization of a Stirling heat engine. Many-objective optimization problem is formed by considering maximization of thermal efficiency, power output, ecological function and exergy efficiency. Multi-objective heat transfer search (MOHTS) algorithm is proposed and applied to obtain a set of Pareto-optimal points. Many objective optimization results form a solution in a four dimensional hyper objective space and for visualization it is represented on a two dimension objective space. Thus, results of four-objective optimization are represented by six Pareto fronts in two dimension objective space. These six Pareto fronts are compared with their corresponding two-objective Pareto fronts. Quantitative assessment of the obtained Pareto solutions is reported in terms of spread and the spacing measures. Different decision making approaches such as LINMAP, TOPSIS and fuzzy are used to select a final optimal solution from Pareto optimal set of many-objective optimization. Finally, to reveal the level of conflict between these objectives, distribution of each decision variable in their allowable range is also shown in two dimensional objective spaces.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Thermodynamic optimization of any system is important to improve its performance and reduce pollution caused by that system [1]. In recent years, Stirling heat engines draw a lot of attentions due to its high theoretical efficiency and energy conservation [2]. A Stirling heat engine is an external combustion, closed cycle engine, which uses external heat source for power generation [3]. Performance parameters of a Stirling heat engine like power output, thermal efficiency, exergy efficiency, pressure drop etc. are sensitive to various geometric and operating parameters such as piston diameter, regenerator diameter, regenerator length, engine's rotation speed, mean effective pressure etc. Further, the effect of each operating parameter on various performance parameters may not be similar [4]. Thus, optimization of a Stirling heat engine is many-objective in nature and it is necessary to carry out simultaneous optimization of all objectives, so Pareto solutions provide more insights into the competing objectives.

Earlier, researchers carried out an extensive work related to the development of thermal model of Stirling heat engines. Babaelahi

and Sayyaadi [5] developed thermal model of Stirling engine for thermal simulation of its prototype. Hosseinzade et al. [6] also proposed thermal model of a Stirling engine and obtained its simulation and optimization results. Araoz et al. [7] presented a thermodynamic model for the performance analysis of a Stirling engine.

Recently, researchers reported the work related to optimization of Stirling heat engine using metaheuristic algorithms. Ahmadi et al. [8] employed finite-speed thermodynamic analysis to obtain an optimum power output and pressure loss of a Stirling heat engine. Simultaneous optimization of thermal efficiency, power output and entropy generation rate of a solar dish-Stirling engine was performed by adapting finite-time thermodynamics and NSGA-II [9]. Thermo-economic optimization of a solar dish-Stirling based on dimensionless thermo-economic objective function was demonstrated by using NSGA-II [10]. Optimization of output power, thermal efficiency and total pressure losses are reported using NSGA-II and finite speed thermodynamic [11]. Optimize value of absorber and working fluid temperature was obtained for the maximization of output power and thermal efficiency of solar power Stirling engine using NSGA-II [12]. Maximization of dimensionless output power, thermal efficiency and entransy rate of the solar-dish Stirling system was obtained using thermodynamic analysis and NSGA-II algorithm [13].

Li et al. [14] analyzed and optimized mechanical power, thermal

^{*} Corresponding author.

E-mail addresses: viveksaparia@gmail.com (V. Patel), vimal.savsani@gmail.com (V. Savsani), anurag.mudgal@pdpu.ac.in (A. Mudgal).

Nomenclature		T	temperature (K)
A_r	heat transfer area of regenerator (m^2)	ΔT	temperature difference (K)
B	parameter for calculating loss co-efficient of regenerator (-)	<i>Greek letters</i>	
b	distance between wires in the regenerator (m)	η	efficiency
D	diameter (m)	ϵ_r	regenerator effectiveness
d	regenerator wire diameter (m)	λ	volumetric ratio during regeneration process
f	co-efficient of friction (-)	μ'	factor depend on volumetric ratio
h	heat transfer co-efficient ($W/m^2 K$)	ρ	density (kg/m^3)
L	regenerator length (m)	τ	temperature ratio
M	parameter for calculating loss co-efficient (-)	γ	specific heat ratio
m	mass (kg)	ν	kinematic viscosity (m^2/s)
N	rotational speed (rpm)	<i>Subscripts</i>	
N_r	number of regenerators per cylinder (-)	C	heat sink
n_r	number of gauges of regenerator matrix (-)	c	cylinder, related to Carnot cycle
P	output power (W)	ex	exergy
p	pressure (MPa)	g	gas
P_m	mean effective pressure (MPa)	H	heat source
Δp	pressure drop (kPa)	h	hot side
Q	heat transfer rate (W)	l	cold side
s	stroke length (m)	r	regenerator
S_{gen}	entropy generation rate (kW/K)		

efficiency and entropy generation rate of Stirling engine using finite physical dimensions thermodynamics and genetic algorithm. Ferreira et al. [15] performed a thermo-economic optimization of Stirling engine used for micro-cogeneration purpose. The authors optimized geometric and operational parameters of engine for thermo-economic consideration. Multi-objective optimization of Stirling engine based on non-ideal adiabatic analysis [16] and third order thermodynamic analysis [17] was reported using NSGA-II. Patel and Savsani [18] investigated a variant of teaching-learning based optimization algorithm for maximizing thermal efficiency, power output and minimizing total pressure drop of the Stirling engine simultaneously. Duan et al. [19] performed multi-objective optimization between power output and efficiency of Stirling engine with cycle irreversibility consideration. Zare and Tavakolpour-Saleh [20] adopted genetic algorithm and presented an optimized design of frequency based free piston Stirling engine. Campos et al.

[21] performed optimization of Stirling engine under different operating and design conditions and reported the behaviour of cycle efficiency under these conditions.

Punnathanam and Kotecha [22] optimized thermal efficiency, output power and entropy generation rate of Stirling engine by adapting NSGA-II. Arora et al. [23] investigated NSGA-II for thermo-economic optimization of solar parabolic dish Stirling heat engine. The author considered power output, efficiency and economic function of the engine for optimization. Hooshang et al. [24] obtained optimized value of output power and efficiency of Stirling engines based on neural network concepts. Luo et al. [25] performed a multi-objective optimization of a GPU-3 Stirling engine and reported an output power of more than 3 kW with 5% rise in thermal efficiency. Many other works related to multi-objective optimizations are reported by the researchers. For example, Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation micro

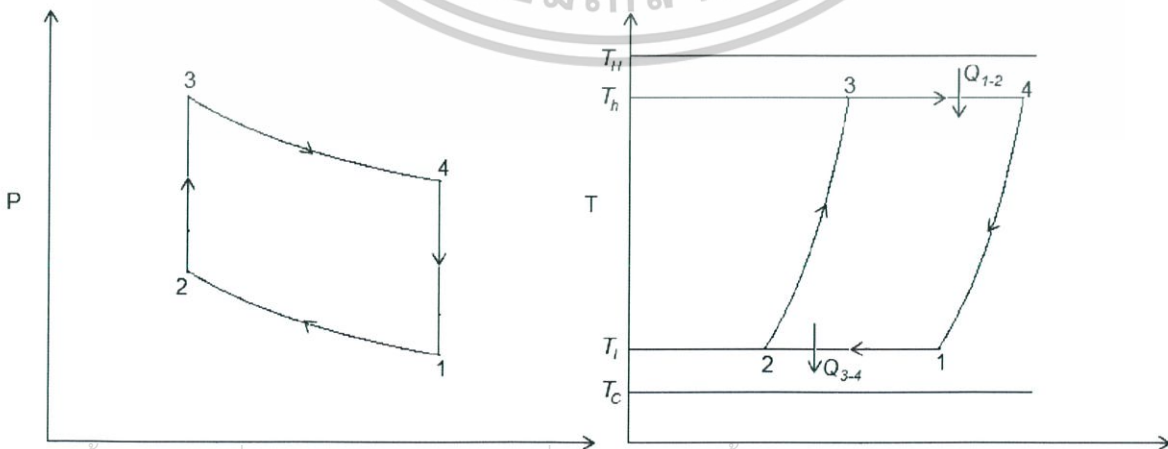
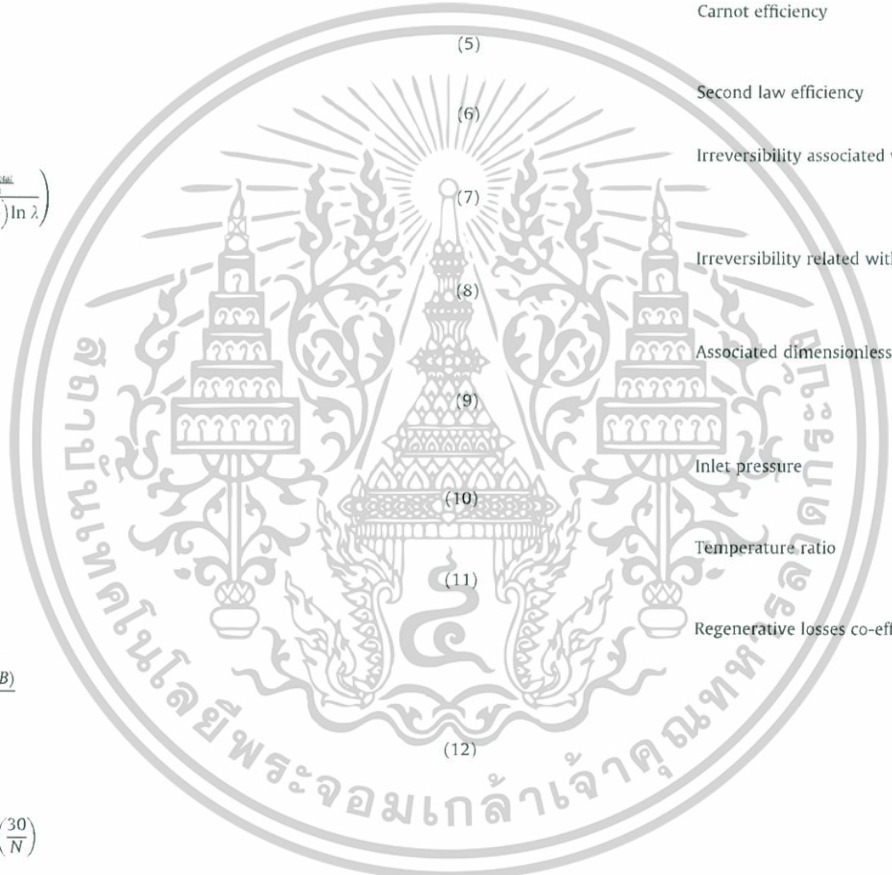


Fig. 1. Thermodynamic cycle of Stirling engine on P-V and T-S coordinate.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1
Modeling equations for Stirling heat engine [5–7,32–34]

Equations	Remarks
$Q_H = (q_h + \Delta q_r) \frac{N}{60} \tag{1}$	Heat transfer rate to working fluid
$q_h = m_g R (T_H - \Delta T_H) \left(1 - \frac{\Delta p_v (\lambda + 1) (\tau + 1)}{4 p_m} - \frac{b \Delta p_r}{2 p_m} - \frac{f \Delta p_f}{p_m} \right) \ln \lambda \tag{2}$	Heat exchanged between source & working fluid
$\Delta q_r = m_g C_{vg} X R (T_H - \Delta T_H - T_C - \Delta T_C) \tag{3}$	Heat loss during the regenerative processes
$\begin{cases} \Delta T_H = T_H - T_h \\ \Delta T_C = T_i - T_C \end{cases} \tag{4}$	Temperature difference
$\eta_c = 1 - \frac{T_C + \Delta T_C}{T_H - \Delta T_H} \tag{5}$	Carnot efficiency
$\eta_{II} = \eta_{II(\Delta p)} \eta_{II(X)} \tag{6}$	Second law efficiency
$\eta_{II(\Delta p)} = 1 - \left(\frac{3 \mu' \frac{\Delta p_{reg}}{p_i}}{\eta' \left(\frac{T_H - \Delta T_H}{T_C + \Delta T_C} \right) \ln \lambda} \right) \tag{7}$	Irreversibility associated with the pressure drop
$\eta_{II(X)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{X}{(\gamma - 1) \ln \lambda} \right) \eta_c} \tag{8}$	Irreversibility related with regenerative processes
$\begin{cases} \mu' = 1 - \left(\frac{1}{3 \lambda} \right) \\ \eta' = \eta_c \eta_{II(1 - \epsilon_r)} \end{cases} \tag{9}$	Associated dimensionless parameters
$p_i = \frac{4 p_m}{(1 + \lambda)(1 + \tau)} \tag{10}$	Inlet pressure
$\tau = \frac{T_h}{T_i} \tag{11}$	Temperature ratio
$\begin{cases} X = X' X_1 + (1 - X') X_2 \\ X_1 = \frac{1 + 2M + \exp(-B)}{2(1 + M)} \\ X_2 = \frac{M + \exp(-B)}{1 + M} \\ M = \frac{m_g C_{vg}}{m_r C_r} \\ B = (1 + M) \left(\frac{h A_r}{m_g C_{vg}} \right) \left(\frac{30}{N} \right) \end{cases} \tag{12}$	Regenerative losses co-efficient & allied parameters
$h = \frac{0.395 \left(\frac{4 p_m}{R_i} \right) \left(\frac{s N}{30} \right)^{0.424} C_{pg} p_i^{0.576}}{(1 + \tau) \left[1 - \frac{\pi}{4 \left(\frac{5}{3} + 1 \right)} \right] D_r^{0.576} P_r^{0.667}} \tag{13}$	Heat transfer co-efficient
$A_r = \frac{\pi^2 D_r^2 L}{4(b + d)} \tag{14}$	Regenerator area
$\Delta p_r = \frac{15}{\gamma} \left(\frac{p_m}{2R(\tau + 1)(T_C + \Delta T_C)} \right) \left(\frac{s^2 N^2}{900} \right) \left(\frac{D_c^2}{\eta_r D_r^2} \right) N_r \tag{15}$	Regenerator pressure drop
$\Delta p_f = \left(\frac{(0.94 + 0.0015 s N) 10^5}{3 \mu'} \right) \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \tag{16}$	Pressure drop due to mechanical friction
$\Delta p_v = \left(\frac{s N}{60} \right) \left(\frac{4 p_m}{(1 + \lambda)(1 + \tau)} \right) \left(\frac{\lambda \ln \lambda}{\lambda - 1} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{T_C + \Delta T_C}} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{T_H - \Delta T_H}{T_C + \Delta T_C}} \right) \left(\sqrt{\frac{\gamma}{R}} \right) \tag{17}$	Pressure drop due to piston speed



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาใช้เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นอญญาติเหมาไปไซบระยะชันตามการค้า
ไม่ว่ากรณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

grid System was obtained using particle swarm optimization algorithm [26]. Multi-objective solutions for optimal allocation of multi-type flexible alternating transmission system were reported in Ref. [27].

Thus, it can be observed from literature survey that, works related to thermodynamic optimization of Stirling engine are reported either for single objective or multi-objective (two or three objective) consideration. However, many-objective thermodynamic optimization of Stirling engine is yet to be reported in the literature. In order to fulfill the gap, present work reports many-objective (i.e. four-objective) thermodynamic optimization of Stirling heat engine. Further, as an optimization tool, heat transfer search (HTS) algorithm [28] is implemented in the present work. Heat transfer search is a recently developed meta-heuristic algorithm based on the natural law of thermodynamics and heat transfer [28]. Researchers reported the application of heat transfer search algorithm for truss topology optimization [29], optimization of semi-active vehicle suspension system [30], sizing optimization of truss structure [31] etc. In this work, a multi-objective variant of heat transfer search (MOHTS) algorithm is introduced to address many-objective optimization problem of a Stirling heat engine.

Main objectives and contributions of the present work are: (i) To develop many-objective thermodynamic optimization problem of Stirling heat engine to maximize thermal efficiency, power output, exergy efficiency and ecological function. (ii) To propose multi-objective variant of the heat transfer search (MOHTS) algorithm and using it to solve many-objective optimization problem of Stirling heat engine (iii) To compare and analyze the results of many-objective (i.e. four-objective) optimization with multi-objective (i.e. two-objective) optimization. (iv) To demonstrate the underlying relationship of the decision variables during many-objective (i.e. four-objective) optimization (v) To select the final optimal solution from the Pareto optimal set of the many-objective optimization with the help of LINMAP, TOPSIS and fuzzy decision making approaches and (vi) To perform the quantitative assessment of obtained Pareto solutions.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 presents the thermal-modeling and the objective functions formulation of Stirling heat engine. Section 3 describes the heat transfer search algorithm. Section 4 explains proposed multi-objective heat transfer search algorithm. Section 5 presents the application example of Stirling heat engine. Section 6 describes the results-discussion. Finally, conclusions are presented in Section 7.

2. System description and modeling formulation

This section deals with the description of Stirling heat engine, thermal hydraulic modeling, objective function formulation and design variables involved in Stirling heat engine design optimization.

2.1. System description

Thermodynamic cycle of a Stirling heat engine is shown in Fig. 1. The cycle consists of two isothermal and two isobaric processes with ideal gas as working fluid. The working fluid compressed isothermally at temperature T_l during compression process 1–2. The isothermal compression is achieved by rejecting compression heat to the heat sink maintained at temperature T_c . Then, the working fluid passes through the regenerator and warms up to temperature T_h by extracting heat from regenerator through constant volume process 2–3. After that, warm working fluid undergoes the isothermal expansion at temperature T_h through process 3–4. During this process, working fluid rejects heat to the heat source at temperature T_H and thereby maintains isothermal

condition. Finally, working fluid undergoes an isobaric cooling through the regenerator during process 4–1. During this process, working fluid cooled to a temperature T_l while rejecting heat to regenerator and completes the cycle.

2.2. Thermal and hydraulic formulation

In the present work, thermal-hydraulic modeling of Stirling heat engine is prepared with consideration of cycle irreversibility [32]. Table 1 shows thermal and hydraulic model formulation of Stirling heat engine.

2.3. Objective functions

In the present work, many-objective optimization is carried out between conflicting thermodynamic objectives. Maximization of thermal efficiency, power output, ecological function and exergy efficiency of Stirling heat engine are considered as objectives. The power output of Stirling heat engine is expressed as [33],

$$P_{out} = \eta Q_H \quad (18)$$

where, Q_H is the heat transfer rate to working fluid and given in Table 1 and η is the efficiency of engine and given by Ref. [34],

$$\eta = \eta_c \eta_{II} \quad (19)$$

where, η_c is the Carnot efficiency, η_{II} is the second law efficiency which takes into account cycle irreversibility and obtained using a thermal hydraulic model given in Table 1. Likewise, the ecological function of Stirling heat engine is expressed as [35],

$$EF = P_{out} - T_0 S_{gen} \quad (20)$$

where, S_{gen} is the entropy generation rate of Stirling heat engine. Finally, exergy efficiency of Stirling heat engine is obtained by,

$$\eta_{ex} = \frac{\left(\left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right) Q_H \right) - \left(\left(1 - \frac{T_0}{T_C} \right) Q_L \right)}{(Q_H - Q_C)} \quad (21)$$

where, T_0 is the environment temperature.

In this work MOHTS algorithm is used for many-objective optimization of a Stirling heat engine, many-objective problem can generally be described as follows,

$$\text{Maximise/Minimise } f(X) = f_1(X), f_2(X), f_3(X), f_4(X) \quad (22)$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_k]$$

where, $f_1(X)$, $f_2(X)$, $f_3(X)$, and $f_4(X)$ represents thermal efficiency, power output, ecological function and exergy efficiency respectively.

2.4. Design variables

In this work, eleven design variables, consisting of geometric as well as operating parameters, which affect the performance of Stirling heat engine, are considered for optimization problem. Piston diameter (D_c), stroke length (s), regenerator diameter (D_r), regenerator length (L) and number of gauzes of the regenerator matrix (n_r) are included as geometric parameters. Rotation speed of engine (N), mean effective pressure (p_m), heat source temperature (T_H), heat sink temperature (T_C), heat source - working fluid temperature difference (ΔT_H) and heat sink - working fluid temperature difference (ΔT_C) are included as operating parameters. Lower and upper limits of these design variables are given below.

$$50 \leq D_c \leq 140$$

$$(23) \quad \begin{cases} X_{j,i}^{new} = X_{k,i}^{old} - R^2 X_{k,i}^{old} & \text{If } f(X_j) > f(X_k) \\ X_{k,i}^{new} = X_{j,i}^{old} - R^2 X_{j,i}^{old} & \text{If } f(X_k) > f(X_j) \end{cases}; \quad \text{If } g \leq g_{max}/CDF$$

$$60 \leq s \leq 100$$

$$(24)$$

$$20 \leq D_r \leq 60$$

$$(25) \quad \begin{cases} X_{j,i}^{new} = X_{k,i}^{old} - r_i X_{k,i}^{old} & \text{If } f(X_j) > f(X_k) \\ X_{k,i}^{new} = X_{j,i}^{old} - r_i X_{j,i}^{old} & \text{If } f(X_k) > f(X_j) \end{cases}; \quad \text{If } g > g_{max}/CDF$$

$$6 \leq L \leq 73$$

$$(26)$$

$$250 \leq n_r \leq 400$$

$$(27)$$

$$1200 \leq N \leq 3000$$

$$(28)$$

$$0.69 \leq p_m \leq 6.89$$

$$(29)$$

$$800 \leq T_H \leq 1300$$

$$(30)$$

$$288 \leq T_c \leq 360$$

$$(31)$$

$$64.2 \leq \Delta T_H \leq 237.6$$

$$(32)$$

$$5 \leq \Delta T_c \leq 25$$

$$(33)$$

Next section describes the heat transfer search algorithm considered in the present work.

3. Heat transfer search algorithm (HTS)

Heat transfer search (HTS) [28] is a recently developed optimization algorithm inspired from the law of thermodynamics and heat transfer. The fundamental law of thermodynamics states that any system always tries to achieve thermal equilibrium with its surroundings. In order to achieve this, a system transfers heat to surroundings as well as to different parts of the system through conduction, convection and radiation. Therefore, the HTS algorithm compose with the 'conduction phase', 'convection phase', and 'radiation phase' to reach an optimum solution.

HTS is a nature-inspired, population-based algorithm [28]. The algorithm starts with a set of solutions to reach at the global optimum value. In HTS, a population is akin to molecules of the system, temperature levels of the molecules represent the value of design variables and energy level of the system represents the fitness value of objective function. The best solution is treated as the surrounding and rest of the solutions are part of the system. Each phase of the HTS algorithm execute with equal probability during the course of optimization. Equal probability is controlled by a parameter 'R' in each generation, which is a uniformly distributed random number, varies between 0 and 1. Working of each phase of HTS algorithm is explained below for minimization problem. Here, size of the population, number of design variables and generation number are denoted by 'n', 'm' and 'g' respectively.

3.1. Conduction phase

This phase simulated the conduction heat transfer between molecules of the substance. In conduction heat transfer, higher energy level molecules transmit heat to adjacent lower energy level molecules. In the course of optimization with HTS algorithm, higher and lower energy level molecule analogues to a population having higher and lesser objective function value. During conduction phase, solutions are updated according to the following equations.

where, $j = 1, 2, \dots, n, j \neq k, k \in (1, 2, \dots, n)$ and $i \in (1, 2, \dots, m)$. Further, k and i are randomly selected solution and design variables. $R \in [0, 0.3333]$ is the probability for selection of conduction phase; $r_i \in [0, 1]$ is a uniformly distributed random number and CDF is the conduction factor.

3.2. Convection phase

This phase simulates convection heat transfer between system and surroundings. In convective heat transfer, surrounding temperature interact with mean temperature of the system. In the course of optimization with HTS algorithm, best solution is assumed as a surrounding while rest of the solutions compose the system. So, the design variable of the best solution interacts with the corresponding mean design variable of the population. In this phase, solutions are updated according to the following equations.

$$X_{j,i}^{new} = X_{j,i}^{old} + R^* (X_s - X_{ms} * TCF) \tag{36}$$

$$\begin{cases} TCF = abs(R - r_i) & \text{If } g \leq g_{max}/COF \\ TCF = round(1 - r_i) & \text{If } g > g_{max}/COF \end{cases} \tag{37}$$

where, $j = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, m$. X_s is the temperature of surrounding and X_{ms} is mean temperature of the system. $R \in [0.3333, 0.6666]$ is the probability for selection of convection phase; $r_i \in [0, 1]$ is a uniformly distributed random number and COF is the convection factor.

3.3. Radiation phase

This phase simulate the radiation heat transfer within the system as well as between system and surrounding. Radiation heat transfer takes place between the system and surrounding as well as within the different part of the system also. In the course of optimization with HTS algorithm, this situation represents the update of any solution with the help of best solution or any other randomly selected solution. In this phase, the solutions are updated as given below.

$$\begin{cases} X_{j,i}^{new} = X_{j,i}^{old} + R^* (X_{k,i}^{old} - X_{j,i}^{old}) & \text{If } f(X_j) > f(X_k) \\ X_{j,i}^{new} = X_{j,i}^{old} + R^* (X_{j,i}^{old} - X_{k,i}^{old}) & \text{If } f(X_k) > f(X_j) \end{cases}; \quad \text{If } g \leq g_{max}/RDF \tag{38}$$

$$\begin{cases} X_{j,i}^{new} = X_{j,i}^{old} + r_i * (X_{k,i}^{old} - X_{j,i}^{old}) & \text{If } f(X_j) > f(X_k) \\ X_{j,i}^{new} = X_{j,i}^{old} + r_i * (X_{j,i}^{old} - X_{k,i}^{old}) & \text{If } f(X_k) > f(X_j) \end{cases}; \quad \text{If } g > g_{max}/RDF \tag{39}$$

where, $j = 1, 2, \dots, n, j \neq k, k \in (1, 2, \dots, n)$ and $i \in (1, 2, \dots, m)$. Further, k is a randomly selected solution. $R \in [0.6666, 1]$ is the probability for selection of radiation phase; $r_i \in [0, 1]$ is a uniformly distributed random number and RDF is the radiation factor.

4. Multi-objective heat transfer search (MOHTS) algorithm

Multi-objective heat transfer search (MOHTS) algorithm uses an external archive to store non-dominated solutions for generation of Pareto front. The MOHTS algorithm uses ϵ -dominance based updating method [36] to check the domination of solutions in archive. Pareto front is generated based on the solutions kept in the external archive.

MOHTS algorithm uses grid based approach with fixed size archive for archiving process. The best solutions found during the update are stored in the archive. ϵ -dominance method has used to update archive in every generation. ϵ -dominance method assumes a space having dimensions equal to the number of objectives of the problem. After that, space is converted in to boxes by slicing each dimension in a ϵ to ϵ size. Solutions are hold in these boxes. Next, the boxes (holding solutions) which are dominated by the other boxes are removed first. In other word, the solutions in those boxes are removed. Then, remaining boxes are examined to contain only one solution. If remaining boxes contain more than one solution then dominated ones are removed from each box. Thus, only non-dominated solutions are retained in the archive, the Pseudo-code of MOHTS is shown in Fig. 2.

5. Application example

Effectiveness of a proposed MOHTS algorithm for many-objective optimization is evaluated by analyzing application of Stirling heat engine which was taken from literature [10,18]. A Stirling heat engine operated by communicating heat with heat source and heat sink is need to be thermodynamically optimized for maximum thermal efficiency, power output, ecological function and exergy efficiency. The engine is equipped with eight regenerators per cylinder. These regenerators are composed from 0.04 mm wire diameter with a distance of 0.0688 mm between successive wires. Specific heat and density of regenerator material are 502.48 J/kg K and 8030 kg/m³ respectively. Specific heat of working gas at constant volume and constant pressure are 3115.6 J/kg K and 5193 J/kg K respectively. Other properties related to working gas are taken from the literature [10,18]. So, the objectives are to find out the geometric and operating parameter of Stirling heat engine for maximum thermal efficiency, power output, ecological function and exergy efficiency.

6. Results and discussion

Initially, single objective optimization of each objective function is carried out to identify the behaviour of objective function with respect to each other. Control parameters of HTS and MOHTS algorithm used in the present investigation are listed in Table 2. Results of single objective optimization are demonstrated in Table 3. From results, it can be observed that when thermal efficiency is maximum (i.e. maximum thermal efficiency consideration) at that time other three objective functions are not at their optimum values. Similar situation can be observed when other objectives (i.e. power output, ecological function, exergy efficiency) are considered individually. Thus, the behaviour of all four objectives is conflicting in nature with respect to each other. So, many-objective (i.e. four-objective) optimization is carried out in the present work to obtain the Pareto solutions with the help of MOHTS algorithm.

The concept of Pareto dominance is of extreme importance in multi/many objective optimization, where some or all of the objectives are mutually conflicting. In this work, all four objectives are conflicting with each other hence no single point yields the best value for all objectives. So, Pareto solutions (Pareto front) are

obtained in the present work for the simultaneous consideration of all four objectives.

For the considered example of Stirling heat engine, 250 design points are generated as Pareto optimal points during many-objective optimization. For visualization of the results of many objective optimization (i.e. simultaneous consideration of all four objectives), the Pareto optimal points of many-objective optimization are represented in two dimension objective space of any two-objective together with the Pareto optimal points of the corresponding objectives. In that way, results of the four-objective optimization of the present application example are represented by six Pareto front in the plan of different combination of two objective functions.

Fig. 3 shows the distribution of Pareto optimal points of four-objective optimization in a two dimension objective space of thermal efficiency and power output together with the Pareto optimal points of the corresponding objectives. Scattered distribution of the Pareto optimal points of four-objective optimization are observed as compared to two-objective optimization. From Fig. 3, it can be observed that for majority of design points, four-objective optimization results in lower thermal efficiency at given power output as compared to two-objective optimization. Thus, the conflicting behaviour between thermal efficiency and power output is elevated in four-objective consideration as compared to two-objective consideration. Further, two different parts can be easily observed in the Pareto points of the four-objective optimization. In one part, thermal efficiency is observed to be increased with increase in power output. In another part, thermal efficiency is increased with simultaneous reduction in power output. Such facts would be very important to the designer to switch from one optimal solution to another for achieving different trade-off requirements of the objectives. Optimal design parameters for five sample data points (A to E) corresponding to Fig. 3 are listed in Table 4. Further, it can be observed from Fig. 3 that there are some points that may looks dominate with respect to other in two dimensional objectives space. For example, X1-X2 with respect to power output and Y1-Y2 with respect to thermal efficiency. However, these individuals are non-dominated when considering all four-objective simultaneously as observed from the results listed in Table 4.

Distribution of Pareto optimal points in the plan of thermal efficiency and ecological function is shown in Fig. 4. Here also, scattered distribution of the Pareto optimal points of four objective optimizations are observed as compared to two objective optimizations. Optimal design parameters for five sample data points corresponding to Fig. 4 are listed in Table 5. Moreover, X1-X2 and Y1-Y2 (as shown in Fig. 4) are the sample design points looks as dominate solutions in two dimension objective space. However, these individuals are non-dominated with respect to many-objective consideration as observed from the results listed in Table 5.

Fig. 5 shows the distribution of Pareto optimal points of four-objective optimization in the plan of thermal efficiency and exergy efficiency. In this case, some design points of the four-objective optimization are overlap on the Pareto front of the two-objective optimization while remaining design points spread out in two dimension objective space. Moreover, wide variation in thermal efficiency and exergy efficiency is observed in four-objective optimization as compared to two-objective optimization which indicates elevated conflicting nature of both the objectives during many-objective consideration. Optimal design parameters for five sample data points (A - E) corresponding to Fig. 5 are listed in Table 6. Further, sample design points X1-X2 and Y1-Y2 are also shown to reveal that solutions are non-dominated with respect to many-objective consideration.

```

Set Population size, function evaluation
Define objective functions, Minimize/Maximize  $f(X) = f_1(X), f_2(X), f_3(X), f_4(X)$ ,  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 
Initialize population, external archives
While (Function evaluation < Maximum function evaluations)
    Randomly generate the probability 'R' to execute conduction, convection or radiation phase
    Update the solution by any one of the phase depending upon the probability 'R'
    Apply the greedy selection between updated solutions and previous solutions
    Initialize grid on the archive
    For each box in the grid
        If any box dominate the other boxes
            Remove the dominated box and their related solutions
        End If
        If the box contain more than one solutions
            Remove the dominated solution(s) from the box
        End If
        If the box still contain more than one solution
            Keep the solution with less distance from the lower right corner of the box (for
            minimization problem) or upper right corner of the box (for maximization
            problem) and remove others
        End If
    End for
End While
Output external archive as Pareto optimal set

```

Fig. 2. Pseudo-code of MOHTS algorithm.

Table 2
Control parameters of HTS algorithm.

Selection probability of conduction phase: 0–0.3333
Selection probability of convection phase: 0.3333–0.6666
Selection probability of radiation phase: 0.6666–1
Conduction factor: 2
Convection factor: 10
Radiation factor: 2

Fig. 6 shows the distribution of Pareto optimal points of four objective optimizations in the plan of power output and ecological function, together with the Pareto optimal points of the corresponding objectives. Here, the Pareto points of four-objective optimization are distributed in two parts. In first part (nearer to left side), the rise in power output is observed with the increase in ecological function. In another part, reduction in power output is observed with increase in ecological function. Optimal design parameters for five sample data points corresponding to Fig. 6 are listed in Table 7. Moreover, to reveal that solutions are non-dominated with respect to many-objective consideration, sample design points X1–X2 and Y1–Y2 are shown in Fig. 6 and listed in Table 7.

Fig. 7 shows the distribution of Pareto optimal points in the plan of power output and exergy efficiency. In this case, the variation range of power output and exergy efficiency is more in four-objective consideration as compared to two-objective

consideration which indicates that the conflicting nature of these objectives is elevated in four-objective consideration. Specification of five sample data points corresponding to Fig. 7 are listed in Table 8. Furthermore, sample design points X1–X2 and Y1–Y2 are also shown and listed to reveal that the solutions are non-dominated with respect to many-objective consideration.

Fig. 8 shows the distribution of Pareto optimal points of four-objective optimization in the plan of ecological function and exergy efficiency, together with the Pareto optimal points of the corresponding objectives. It can be observed that majority design points of four-objective optimization are overlap on the Pareto points of two-objective optimization while remaining design points distributed nearer to Pareto front. Thus, the conflicting behaviour between ecological function and exergy efficiency is not varied significantly in four-objective consideration as compared to two-objective consideration. Specification of five sample data points corresponding to Fig. 8 are listed in Table 9. Moreover, sample

Table 3
Optimal result with single objective consideration.

	Objectives			
	Thermal Efficiency	Power (kW)	Ecological function (kW)	Exergy efficiency
N (rpm)	1200	3000	3000	1200
P_m (Mpa)	6.890	6.890	1.332	6.890
s (mm)	60	60	60	60
T_H (K)	1300	1300	1300	1300
T_C (K)	288	288	288	360
ΔT_H (K)	64.2	64.2	64.2	237.6
ΔT_C (K)	5	5	5	5
n_r	301.9	400	396.9	250
D_c (mm)	50	50	51.6	50
D_r (mm)	60	60	20	60
L (mm)	73	73	6	73
Thermal Efficiency	0.2013	0.1718	0.0011	0.1857
Power (kW)	7.081	15.056	0.208	5.068
Ecological function (kW)	27.155	67.679	144.815	20.490
Exergy efficiency	0.8290	0.8286	0.7958	0.8446

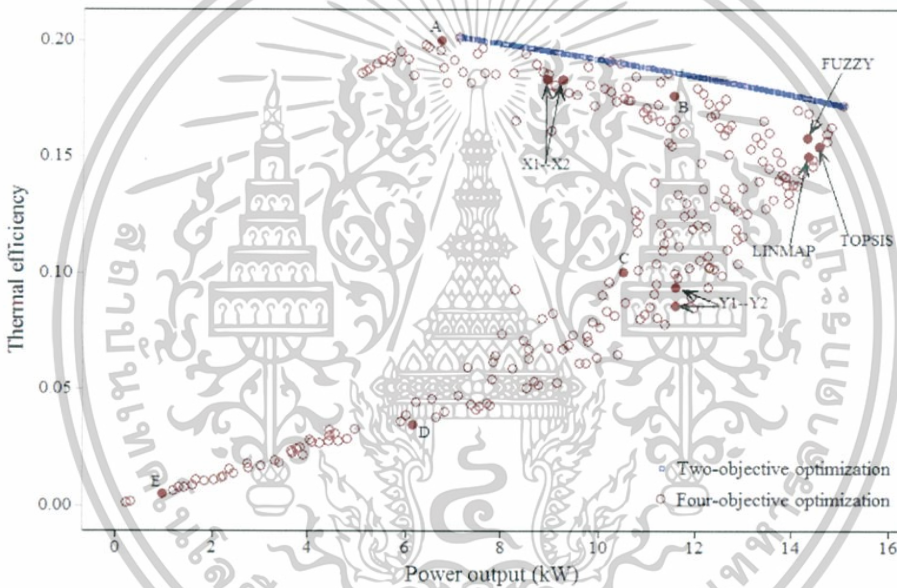


Fig. 3. Variation of thermal efficiency with power output in both 4-objective and 2-objective optimization.

Table 4
Optimal operating parameters for sample design point (A-E) in the plan of thermal efficiency and power output.

	A	B	C	D	E	X1	X2	Y1	Y2
N (rpm)	1200	2400.2	3000	3000	3000	1828.5	1804.6	3000	3000
P_m (Mpa)	6.890	6.443	3.714	2.672	1.379	6.890	6.040	3.542	6.199
s (mm)	60	60.2	60	60	60	61.3	60.9	60	60
T_H (K)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
T_C (K)	288	288	288	288	288	288	288	288	288
ΔT_H (K)	108.3	136.4	163.1	81	64.7	139	152.7	66.5	86.7
ΔT_C (K)	5.1	5.1	5	5	5	5.1	5.1	5	5
n_r	250	368.5	298.8	309.2	398.3	349.2	338.2	393.1	398
D_c (mm)	140	95.4	50.6	118.4	50.3	121.7	76.3	50	55.6
D_r (mm)	60	59.7	25.3	24.8	22.6	42.1	48.3	31.9	28.2
L (mm)	73	61	47.9	6	8.5	73	69.1	28.5	14.5
Thermal Efficiency	0.1997	0.1763	0.1004	0.0345	0.0051	0.1830	0.1830	0.0939	0.0861
Power (kW)	6.718	11.535	10.481	6.124	0.943	9.237	8.919	11.590	11.590
Ecological function (kW)	25.978	50.541	80.571	136.794	142.101	38.962	37.647	95.165	103.830
Exergy efficiency	0.8319	0.8334	0.8185	0.7975	0.7963	0.8328	0.8343	0.8105	0.8069

design points X1-X2 and Y1-Y2 are also shown to reveal that the solutions are non-dominated with respect to many-objective consideration. Many-objective optimization utilizes different decision making

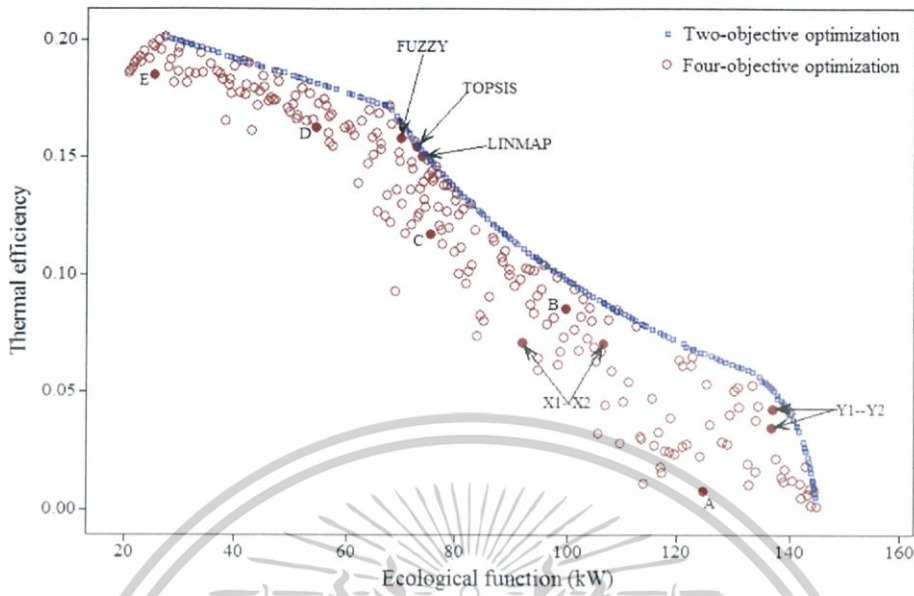


Fig. 4. Variation of thermal efficiency with ecological function in both 4-objective and 2-objective optimization.

Table 5
Optimal operating parameters for sample design point (A-E) in the plan of thermal efficiency and ecological function.

	A	B	C	D	E	X1	X2	Y1	Y2
N (rpm)	3000	3000	3000	2765.5	1416.3	3000	3000	3000	3000
P_m (Mpa)	1.652	3.311	6.822	5.788	6.890	5.033	2.941	3.660	2.672
s (mm)	60	60	60.1	60.4	60	60.1	60	60	60
T_H (K)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
T_C (K)	288	288	288	291.8	330.8	288	288	288	288
ΔT_H (K)	173.3	64.2	185.1	200.7	237.6	225.8	72.8	82.2	81
ΔT_C (K)	5	5	5	5	5.1	5	5	5	5
n_r	391.4	400	400	395	250	339.8	374.9	355.4	309.2
D_c (mm)	57	50	50.7	50.4	50	62.4	81.5	105.4	118.4
D_r (mm)	20	31.1	60	47.9	60	52.2	29.5	20	24.8
L (mm)	11.1	27.2	8.9	71.8	73	6	24.8	6	6
Thermal Efficiency	0.0079	0.0856	0.1171	0.1625	0.1851	0.0709	0.0707	0.0424	0.0345
Power (kW)	1.282	11.057	11.437	11.446	6.127	8.449	9.766	7.530	6.124
Ecological function (kW)	124.762	99.594	75.394	54.354	25.154	91.926	106.526	136.872	136.794
Exergy efficiency	0.8003	0.8085	0.8221	0.8380	0.8436	0.8121	0.8059	0.7975	0.7975

methods in order to select best solution from Pareto optimal points. Different methods used for the process of decision making are available in the literature [37]. In this work, three decision making methods including LINMAP, TOPSIS and Fuzzy have been used. The detail description related to working of each method is also available in the literature [37]. The final solutions selected by the LINMAP, TOPSIS and Fuzzy decision making methods are shown in Figs. 3–8 and listed in Table 10. According to results, solution obtained by LINMAP and TOPSIS are approach towards each other.

For quantitative assessment of Pareto solutions, spread and spacing of Pareto optimal solutions are obtained. Spacing and spread measures are used for identifying the accuracy of Pareto solutions. The spacing metric [38] is a relative distance measure between consecutive solutions in the obtained Pareto solutions and calculated using the following equation.

$$S = \sqrt{\frac{1}{|P|} \sum_{i=1}^{|P|} (d_i - \bar{d})^2} \tag{40}$$

where P is the set of obtained Pareto solutions, d_i is the distance measured between successive solutions and \bar{d} is the mean value of

distance measured. Thus, spacing metric measures the standard deviations of different d_i values. Therefore, an algorithm finding a set of non-dominated solutions having smaller spacing (S) is better.

Similarly, the spread metric [38] measures the extent of spread achieved among the obtained Pareto solutions. Deb [38] suggested the below mentioned equation to obtain the spread metric (Δ) of the Pareto solutions.

$$\Delta = \frac{\sum_{m=1}^M d_m^e + \sum_{i=1}^{|P|} |d_i - \bar{d}|}{\sum_{m=1}^M d_m^e + |P|\bar{d}} \tag{41}$$

where, m indicates the number of objectives. d_i represents the Euclidean distances between neighboring solutions having the mean value \bar{d} and d_m^e is the distance between extreme solutions. An algorithm finding a smaller value of Δ is able to find a better diverse set of non-dominated solutions.

Table 11 shows the Spacing and Spread measure of the Pareto solutions for the considered case study. From results, it can be observed that reasonably small value of Spacing and Spread measure are obtained for the Pareto solutions of the present case study.

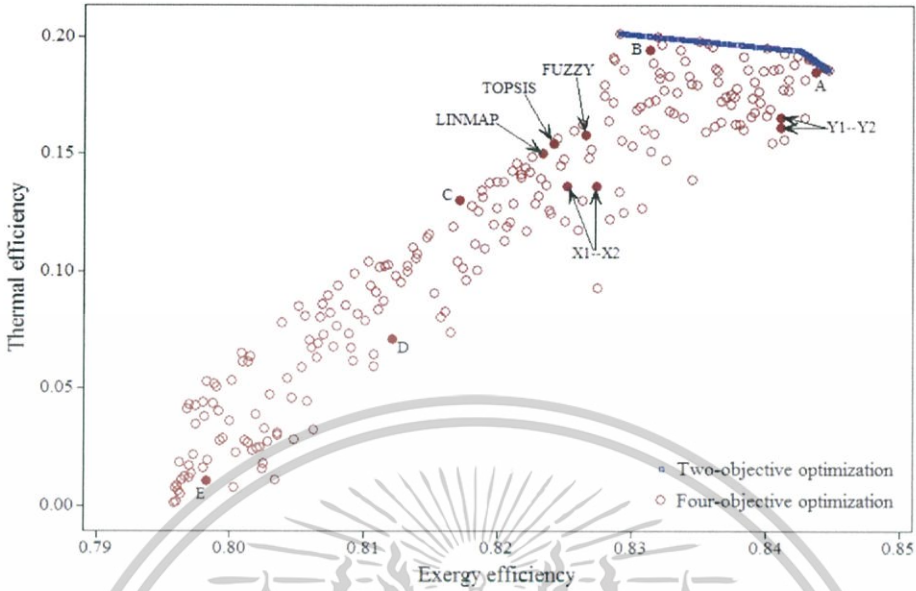


Fig. 5. Variation of thermal efficiency with exergy efficiency in both 4-objective and 2-objective optimization.

Table 6
Optimal operating parameters for sample design point (A-E) in the plan of thermal efficiency and exergy efficiency.

	A	B	C	D	E	X1	X2	Y1	Y2
N (rpm)	1416.3	1548	3000	3000	3000	3000	3000	2776.9	2294.9
P_m (Mpa)	6.890	6.890	6.890	5.033	1.349	5.579	3.584	6.890	4.069
s (mm)	60	60	60	60.1	60	60	60.1	60.9	60
T_H (K)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
T_C (K)	330.8	288	288	288	288	288	288	288	304.1
ΔT_H (K)	237.6	100.7	64.2	225.8	69.4	140.8	136.7	227.6	231.3
ΔT_C (K)	5.1	5.1	5	5	5	5	5	5.2	5
n_r	250	250	367	339.8	397.8	316.4	373.8	252.8	271.9
D_c (mm)	50	140	135.5	62.4	62	51.8	60.6	76.4	62.8
D_r (mm)	60	60	20	52.2	20.7	37.7	36.7	60	46.8
L (mm)	73	73	57.6	6	24.8	31.8	56.1	73	73
Thermal Efficiency	0.1851	0.1941	0.1299	0.0709	0.0105	0.1360	0.1360	0.1652	0.1610
Power (kW)	6.127	8.486	13.931	8.449	1.809	12.607	12.157	11.251	9.008
Ecological function (kW)	25.154	33.753	32.714	91.926	132.872	71.537	69.023	52.611	42.961
Exergy efficiency	0.8436	0.8313	0.8171	0.8121	0.7983	0.8251	0.8273	0.8410	0.8411

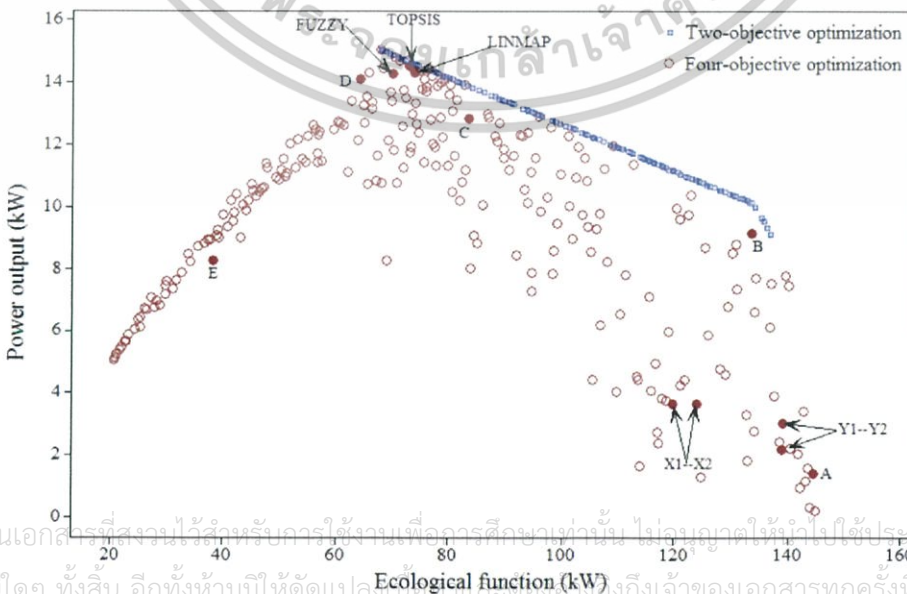


Fig. 6. Variation of power output with ecological function in both 4-objective and 2-objective optimization.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และที่ยังคงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 7
Optimal operating parameters for sample design point (A-E) in the plan of power output and ecological function.

	A	B	C	D	E	X1	X2	Y1	Y2
N (rpm)	3000	3000	3000	2927.4	2110.77	3000	3000	3000	3000
P_m (Mpa)	1.483	4.624	5.173	6.626	6.890	2.619	2.160	1.641	1.688
s (mm)	60	60	60	60.3	73.4	60	60	60	60
T_H (K)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
T_C (K)	288	288	288	288	314.3	288	288	288	288
ΔT_H (K)	64.2	64.2	88.5	97.2	237.6	216.3	164.2	64.3	97.8
ΔT_C (K)	5	5	5	5.1	5	5	5	5	5
n_r	385.4	393.1	391.9	375.9	400	303.9	392.3	399.6	381.7
D_c (mm)	52.4	56.4	79.2	113.4	50	50	76.5	50	50
D_r (mm)	20	20.2	20.1	58	60	20	20.4	26.2	20
L (mm)	6	8.4	61.2	69.8	73	6	10.8	8.8	6
Thermal Efficiency	0.0075	0.0529	0.1189	0.1700	0.1655	0.0236	0.0228	0.0168	0.0121
Power (kW)	1.405	9.149	12.850	14.098	8.273	3.659	3.663	3.029	2.175
Ecological function (kW)	144.433	133.408	83.406	64.033	38.241	119.667	124.056	139.061	138.969
Exergy efficiency	0.7959	0.7982	0.8167	0.8306	0.8428	0.8017	0.8005	0.7969	0.7970

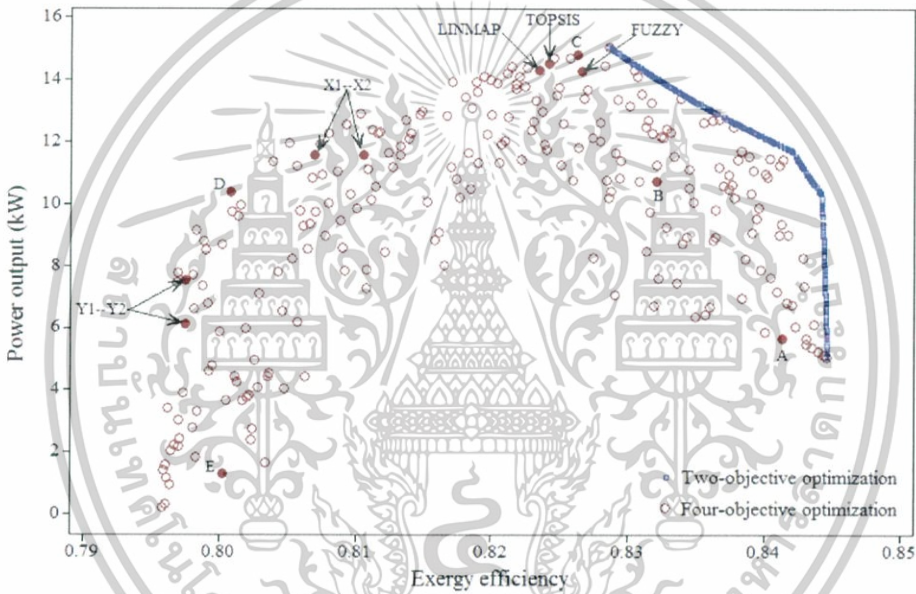


Fig. 7. Variation of power output with exergy efficiency in both 4-objective and 2-objective optimization.

Thus, the proposed algorithm had reasonably good ability to obtain non-dominated as well as diverse solutions.

To identify the underlying relationship of decision variables

with many-objective optimization, values of the decision variables corresponding to four-objective optimization are plotted for all 250 design points in Fig. 9(a)–(k). It can be observed from these figures

Table 8
Optimal operating parameters for sample design point (A-E) in the plan of power output and exergy efficiency.

	A	B	C	D	E	X1	X2	Y1	Y2
N (rpm)	1200	2091	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
P_m (Mpa)	6.890	6.890	6.524	5.322	1.652	3.542	6.199	3.660	2.672
s (mm)	60.0	60	60	60	60	60.0	60.0	60	60
T_H (K)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
T_C (K)	307	288	288	288	288	288	288	288	288
ΔT_H (K)	219.2	113.8	64.2	64.2	173.3	66.5	86.7	82.2	81
ΔT_C (K)	5.1	5.1	5	5	5	5	5	5	5
n_r	250	250	293	397.8	391.4	393.1	398	355.4	309.2
D_c (mm)	55	140	50	56.4	57	50	55.6	105.4	118.4
D_r (mm)	60	60	51	20.3	20	31.9	28.2	20	24.8
L (mm)	73	73	34.6	13.7	11.1	28.5	14.5	6	6
Thermal Efficiency	0.1929	0.1844	0.1627	0.0651	0.0079	0.0939	0.0861	0.0424	0.0345
Power (kW)	5.652	10.732	14.806	10.382	1.282	11.590	11.588	7.530	6.124
Ecological function (kW)	22.483	44.942	70.245	122.848	124.762	95.165	103.830	136.872	136.794
Exergy efficiency	0.8412	0.8321	0.8262	0.8008	0.8003	0.8105	0.8069	0.7975	0.7975

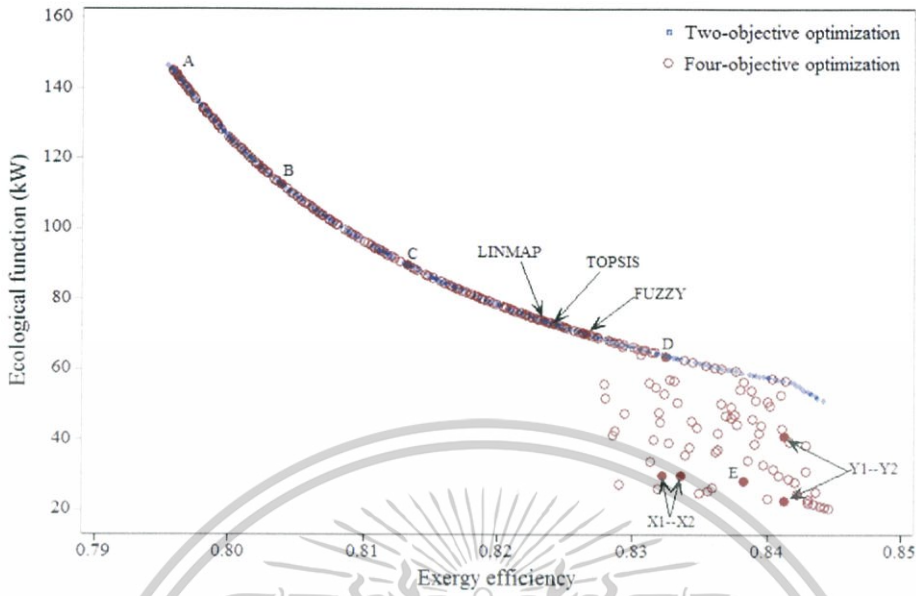


Fig. 8. Variation of ecological function with exergy efficiency in both 4-objective and 2-objective optimization.

Table 9
Optimal operating parameters for sample design point (A-E) in the plan of ecological function and exergy efficiency.

	A	B	C	D	E	X1	X2	Y1	Y2
N (rpm)	3000	3000	3000	2994.9	1422.4	1385.1	1415.9	1200	2146.6
P_m (Mpa)	1.450	6.101	4.418	6.826	6.742	6.89	6.89	6.89	6.89
s (mm)	60	60	60	61.5	60.1	60	60.4	60	60.2
T_H (K)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
T_C (K)	288	288	288	288	288.9	288	296.7	307	288
ΔT_H (K)	69.1	68.8	94.9	190.6	192.8	113.1	130.9	219.2	227.1
ΔT_C (K)	5	5	5	5	5	5.1	5.2	5.1	5
n_r	384.5	386.9	320.4	279.3	271.5	250	385.8	250	275.7
D_c (mm)	50.4	54.2	67.1	78	69.7	140	105.8	55	140
D_r (mm)	21	20	37.9	58.8	59.7	60	60	60	60
L (mm)	6.4	19.2	20.1	18.7	66.9	73	73	73	73
Thermal Efficiency	0.0063	0.0778	0.1023	0.1471	0.1915	0.1964	0.1941	0.1929	0.1773
Power (kW)	1.162	11.358	11.875	12.127	6.975	7.586	7.469	5.652	9.352
Ecological function (kW)	143.250	112.553	89.545	63.670	28.132	29.829	29.636	22.483	40.747
Exergy efficiency	0.7961	0.8038	0.8132	0.8325	0.8383	0.8322	0.8336	0.8412	0.8412

that scatter distribution of design variable namely P_m , ΔT_H , n_r , D_c , D_r and L are observed in the entire search domain during many-objective consideration. Conflicting effects of these variables generate trade-off in the Pareto points during many-objective

consideration. Scatter distribution of the regenerator rotational speed is observed for certain data point only. Thus, regenerator rotational speed exhibited moderate conflicting effect during many-objective consideration. Other decision variables namely s , T_H , T_C and ΔT_C are nearly constant over the entire Pareto point distribution. Thus, these design variables doesn't produced conflicting effect during many-objective consideration.

Table 10
Decision making of many objective optimization results.

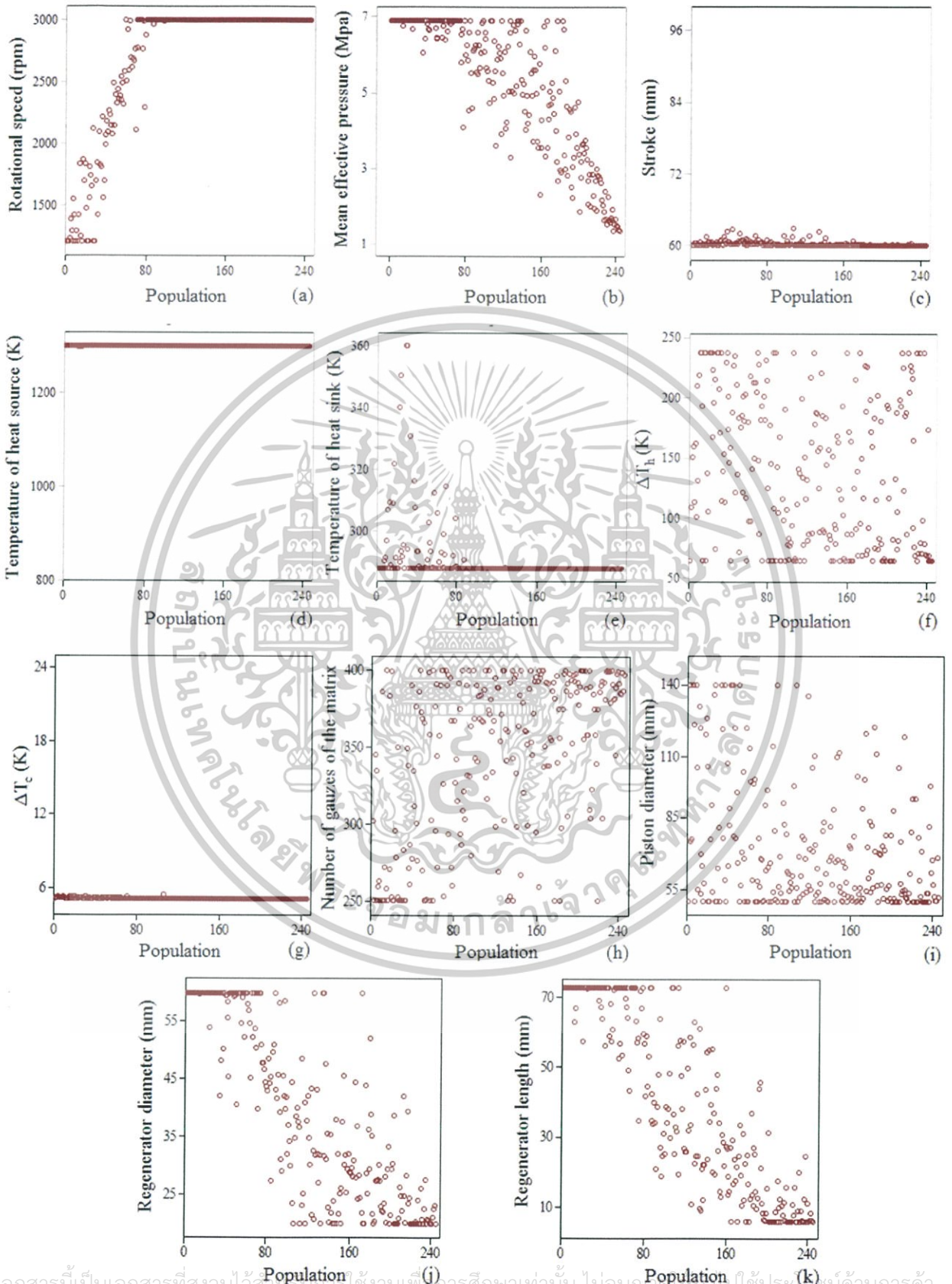
	LINMAP	TOPSIS	FUZZY
N (rpm)	3000	3000	3000
P_m (Mpa)	5.490	6.176	4.519
s (mm)	60	60.1	60.5
T_H (K)	1300	1300	1300
T_C (K)	288	288	288
ΔT_H (K)	64.2	64.2	64.2
ΔT_C (K)	5	5	5
n_r	331.4	308.5	391.7
D_c (mm)	50	50	114.3
D_r (mm)	39.4	43.2	45.5
L (mm)	38.7	33.8	53.1
Thermal Efficiency	0.15	0.1544	0.1579
Power (kW)	14.325	14.55	14.302
Ecological function (kW)	73.704	72.725	69.922
Exergy efficiency	0.8234	0.8242	0.8265

7. Conclusion

In the present work, mathematical formulation for many-

Table 11
Spacing and Spread measure of many-objective Pareto solutions.

	Spacing	Spread
Thermal efficiency - Power output	1.06	2.11
Thermal efficiency - Ecological function	0.96	2.87
Thermal efficiency - Exergy efficiency	1.12	2.46
Power output - Ecological function	1.19	2.53
Power output - Exergy efficiency	1.38	2.78
Ecological function - Exergy efficiency	0.43	1.11



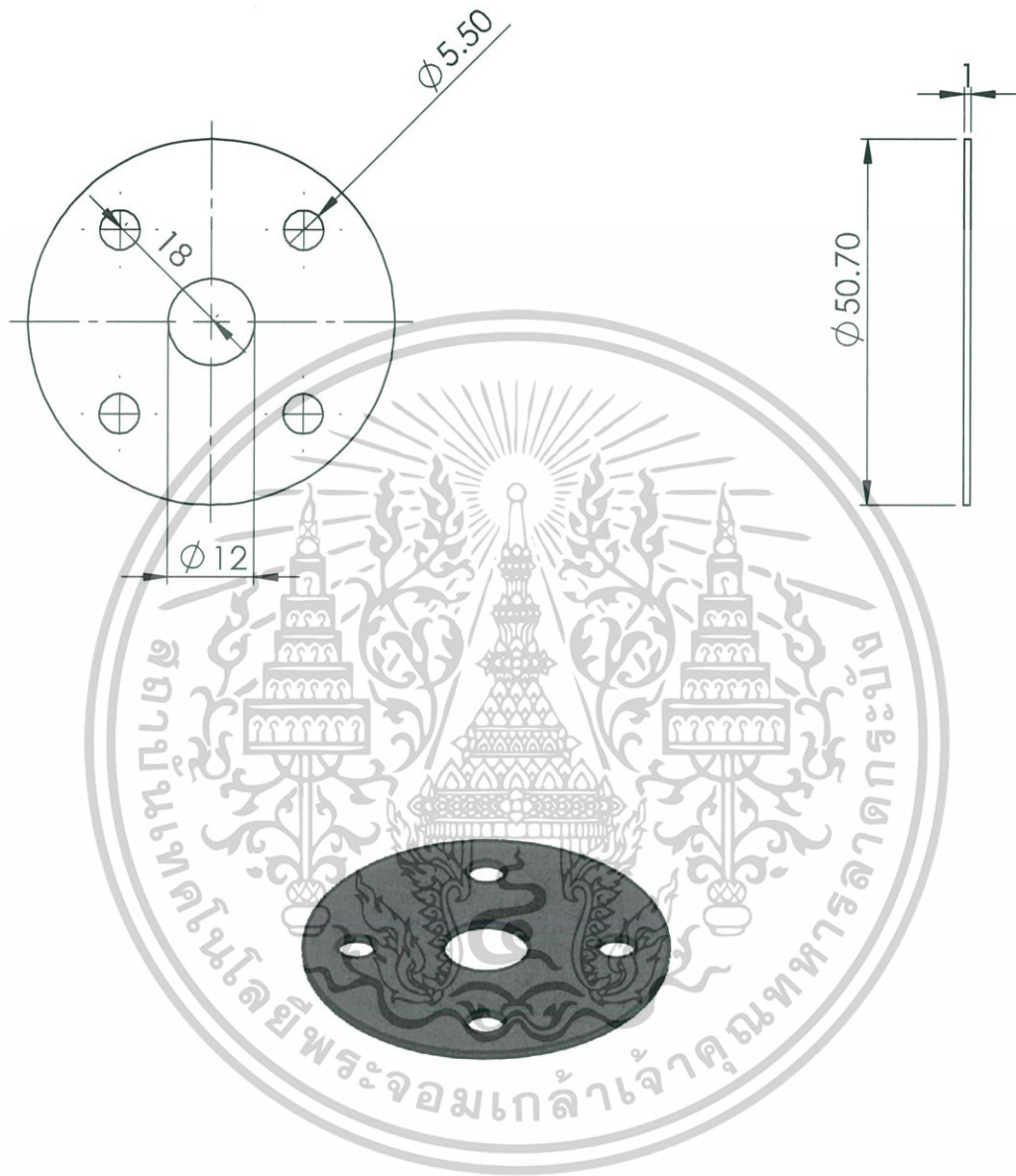
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 Fig. 9. Distribution of design variables in 4-objective optimization ((a) N (b) P_m (c) s (d) T_H (e) T_C (f) ΔT_h (g) T_c (h) n_r (i) D_c (j) D_r and (k) L_r).
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

objective optimization of a Stirling heat engine is developed and investigated to identify the best combination of design parameters that affect different desired criteria. Maximization of thermal efficiency, power output, ecological function and exergy efficiency of Stirling heat engine are considered as four different objectives in this work. Eleven design variables which include geometric as well as operating parameters are considered for the optimization. To solve this many-objective optimization problem a new method called multi-objective heat transfer search (MOHTS) algorithm is proposed and experimented. Results are obtained in the form of a set of Pareto-optimal points in a four dimensional hyper objective space that cannot be visualized and analyzed easily. So, the results are represented in two dimensional objective space where it is compared with the results (Pareto front) obtained by solving corresponding two objective (multi-objective) optimization problem. This comparison is very crucial to the designer to switch their decision from one optimal solution to another for achieving different trade-off requirements of various objectives. In addition, distribution of each design variables in their allowable range is also presented. Results reveal the level of conflict between these four objectives. Design variables namely mean effective pressure, heat source - working fluid temperature difference, number of gauzes of the regenerator matrix, piston diameter, regenerator diameter and length are found to be important operating/geometric parameters which has caused a strong conflict between objective functions. A final optimal solution is selected from Pareto optimal points using three decision making methods including LINMAP, TOPSIS and Fuzzy. Results obtained by using LINMAP and TOPSIS are nearly identical and is considered as the optimal solution available from the Pareto points. Analysis is also carried out to quantify the obtained Pareto solutions by finding its spacing and spread measures, which indicate that the proposed algorithm had reasonably good ability to obtain non-dominated as well as diverse solutions. Finally, it can be observed that many-objective approach leads to more realistic thermodynamic optimization of the Stirling heat engine as compared to multi-objective approaches.

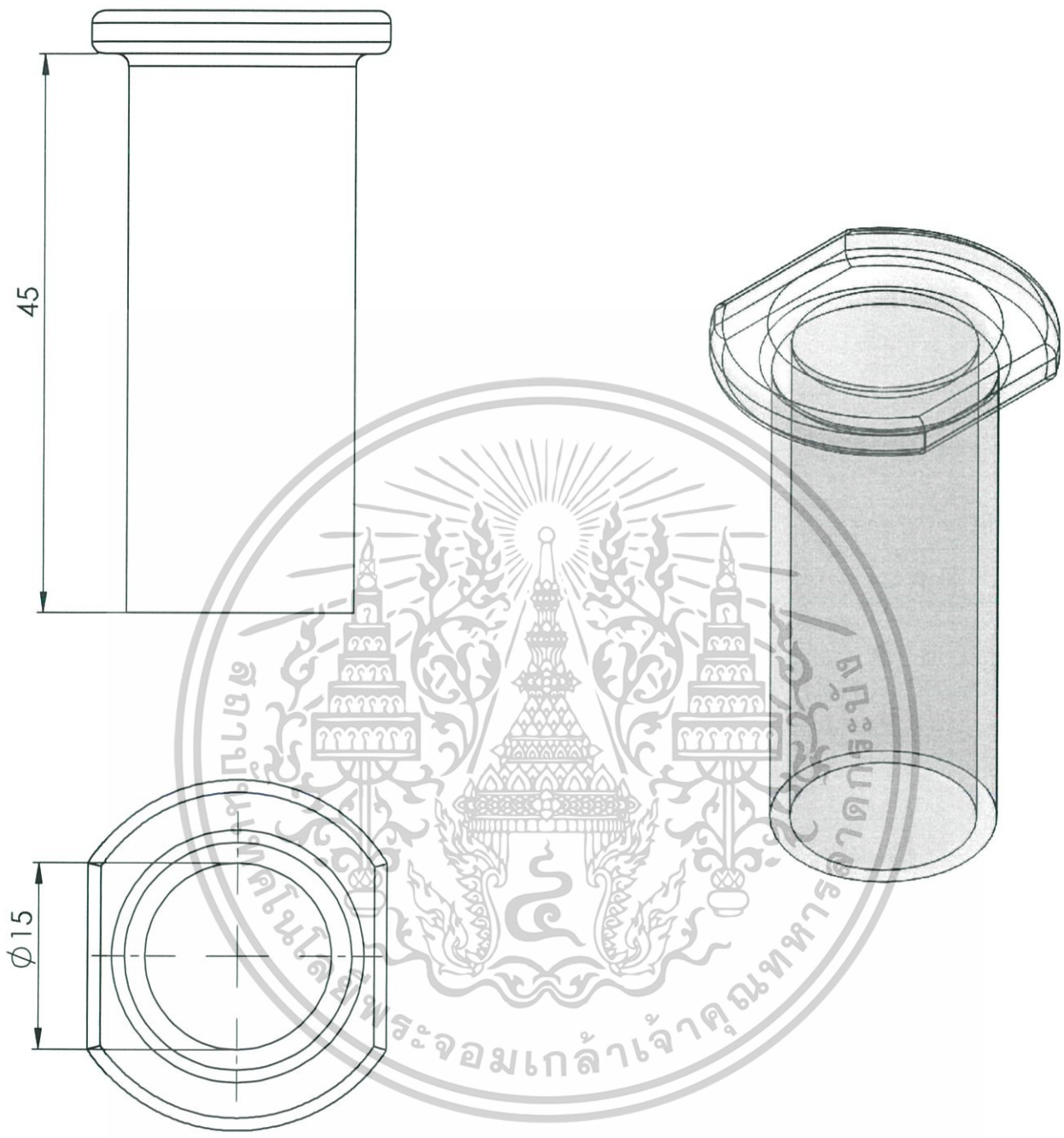
References

- [1] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. *Thermal design and optimization*. New York: Wiley; 1996.
- [2] Cheng CH, Yu YJ. Numerical model for predicting thermodynamic cycle and thermal efficiency of a beta-type Stirling engine with rhombic-drive mechanism. *Renew Energy* 2010;35(11):590–601.
- [3] Walker G. *Stirling engines*. Oxford: Clarendon Press; 1980.
- [4] Babaelahi M, Sayyaadi H. Simple-II: a new numerical thermal model for predicting thermal performance of Stirling engines. *Energy* 2014;69:873–90.
- [5] Babaelahi M, Sayyaadi H. A new thermal model based on polytropic numerical simulation of Stirling engines. *Appl Energy* 2015;141:143–59.
- [6] Hosseinzade H, Sayyaadi H, Babaelahi M. A new closed-form analytical thermal model for simulating Stirling engines based on polytropic-finite speed thermodynamics. *Energy Convers Manage* 2015;90:395–408.
- [7] Araoz JA, Cardoza E, Salomona M, Alejo L, Fransson TH. Development and validation of a thermodynamic model for the performance analysis of a gamma Stirling engine prototype. *Appl Therm Eng* 2015;83:16–30.
- [8] Ahmadi MH, Ahmadi MA, Pourfayaz F, Bidi M, Hosseinzade H, Feidt M. Optimization of powered Stirling heat engine with finite speed thermodynamics. *Energy Convers Manage* 2016;108:96–105.
- [9] Ahmadi MH, Mohammadi AH, Dehghani S, Barranco-Jimenez MA. Multi-objective thermodynamic-based optimization of output power of solar dish-stirling engine by implementing an evolutionary algorithm. *Energy Convers Manage* 2013;75:438–45.
- [10] Ahmadi MH, Sayyaadi H, Mohammadi AH, Barranco-Jimenez MA. Thermoeconomic multi-objective optimization of solar dish-stirling engine by implementing evolutionary algorithm. *Energy Convers Manage* 2013;73:370–80.
- [11] Ahmadi MH, Hosseinzade H, Sayyaadi H, Mohammadi AH, Kimiaghani F. Application of the multi-objective optimization method for designing a powered Stirling heat engine: design with maximized power, thermal efficiency and minimized pressure loss. *Renew Energy* 2013;60:313–22.
- [12] Ahmadi MH, Sayyaadi H, Dehghani S, Hosseinzade H. Designing a solar powered Stirling heat engine based on multiple criteria: maximized thermal efficiency and power. *Energy Convers Manage* 2013;75:282–91.
- [13] Ahmadi MH, Ahmadi MA, Mellit A, Pourfayaz F, Feidt M. Thermodynamic analysis and multi objective optimization of performance of solar dish Stirling engine by the centrality of entransy and entropy generation. *Int J Elec Power* 2016;78:88–95.
- [14] Li R, Grosu L, Queiros-Conde D. Multi-objective optimization of Stirling engine using finite physical dimensions thermodynamics (FPDT) method. *Energy Convers Manage* 2016;124:517–27.
- [15] Ferreira AC, Nunes ML, Teixeira JCF, Martins LASB, Teixeira SFCE. Thermodynamic and economic optimization of a solar-powered Stirling engine for micro-cogeneration purposes. *Energy* 2016;111:1–17.
- [16] Toghyani S, Kasaeian A, Ahmadi MH. Multi-objective optimization of Stirling engine using non-ideal adiabatic method. *Energy Convers Manage* 2014;80:54–62.
- [17] Toghyani S, Kasaeian A, Hashemabadi SH, Salimi M. Multi-objective optimization of GPU3 Stirling engine using third order analysis. *Energy Convers Manage* 2014;87:521–9.
- [18] Patel VK, Savsani VJ. Multi-objective optimization of a Stirling heat engine using TS-TEBO (tutorial training and self learning inspired teaching-learning based optimization) algorithm. *Energy* 2016;95:528–41.
- [19] Duan C, Wang X, Shu S, Jing C, Chang H. Thermodynamic design of Stirling engine using multi-objective particle swarm optimization algorithm. *Energy Convers Manage* 2014;84:88–96.
- [20] Zare SH, Tavakolpour-Saleh AR. Frequency-based design of a free piston Stirling engine using genetic algorithm. *Energy* 2016;109:466–80.
- [21] Campos MC, Vargas JVC, Ordóñez JC. Thermodynamic optimization of a Stirling engine. *Energy* 2012;44(1):902–10.
- [22] Punathanam V, Kotecha P. Effective multi-objective optimization of Stirling engine systems. *Appl Therm Eng* 2016;108:261–76.
- [23] Arora R, Kaushik SC, Kumar R, Arora R. Multi-objective thermo-economic optimization of solar parabolic dish Stirling heat engine with regenerative losses using NSGA-II and decision making. *Int J Elec Power* 2016;74:25–35.
- [24] Houshang M, Moghadami RA, Nia SA, Masouleh MT. Optimization of Stirling engine design parameters using neural networks. *Renew Energy* 2015;74:855–66.
- [25] Luo Z, Sultan U, Ni M, Peng H, Shi B, Xiao G. Multi-objective optimization for GPU3 Stirling engine by combining multi-objective algorithms. *Renew Energy* 2016;94:114–25.
- [26] Baghaee HR, Mirsalim M, Gharehpetian GB, Talebi HA. Reliability/cost based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation micro grid system. *Energy* 2016;115(1):1022–41.
- [27] Baghaee HR, Mirsalim M, Gharehpetian GB, Talebi HA. Security/cost-based optimal allocation of multi-type FACTS devices using multi-objective particle swarm optimization. *Simulation* 2012;88(8):999–1010.
- [28] Patel VK, Savsani VJ. Heat transfer search (HTS): a novel optimization algorithm. *Int Sci* 2015;20:234–234.
- [29] Savsani VJ, Tejani GG, Patel VK, Savsani PV. Modified meta-heuristics using random mutation for truss topology optimization with static and dynamic constraints. *J Comput Des Eng* 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcde.2016.10.002>.
- [30] Garg A, Arvind A, Gadiyi B. Optimum control for the vehicle semi-active suspension system. In: *Mechatronics and robotics engineering for advanced and intelligent manufacturing*. Springer International Publishing; 2017. p. 421–30.
- [31] Degertekin S, Lamberti L, Hayalioğlu M. Heat transfer search algorithm for sizing optimization of truss structures. *Lat Am J Solids Struct* 2016;13:1–27.
- [32] Costea M, Petrescu S, Harman C. The effect of irreversibilities on solar Stirling engine cycle performance. *Energy Convers Manage* 1999;40:1723–31.
- [33] Petrescu S, Petre C, Costea M, Malancioiu O, Boriaru N, Dobrovicescu A, et al. A methodology of computation, design and optimization of solar Stirling power plant using hydrogen/oxygen fuel cells. *Energy* 2010;35(2):729–39.
- [34] Petrescu S, Costea M, Harman C, Florea T. Application of the direct method to irreversible Stirling cycles with finite speed. *Int J Energy Res* 2002;26:589–609.
- [35] Angulo-Brown F. An ecological optimization criterion for finite time heat engines. *J Appl Phys* 1991;69(11):7465–9.
- [36] Deb K, Mohan M, Mishra S. Evaluating the epsilon-dominance based multi-objective evolutionary algorithm for a quick computation of Pareto-optimal solutions. *Evol Comput* 2005;13(4):501–25.
- [37] Hwang CL, Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey, vol. 186. Springer Science & Business Media; 2012.
- [38] Deb K. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. New York: John Wiley & Sons; 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

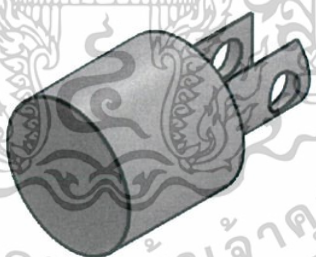
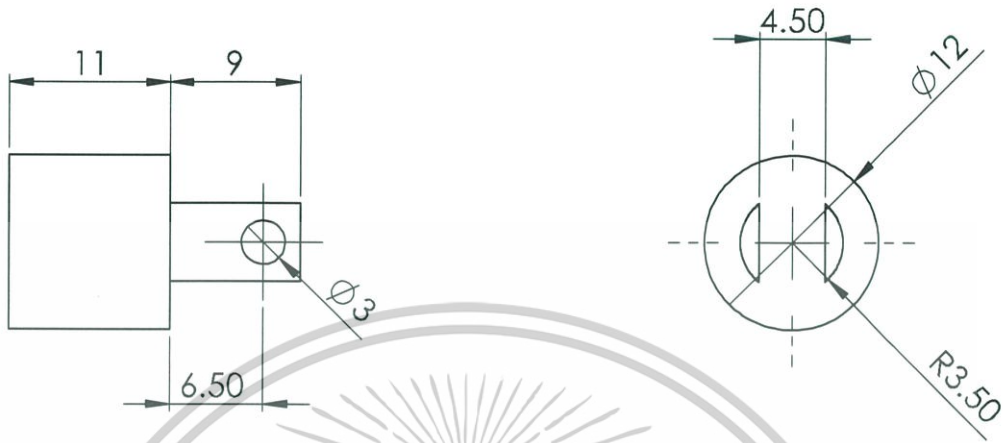


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN		CHK'D		APPVD		ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า			
MFG		Q.A.		MATERIAL:		ไม่วารณใดๆ ที่ สัน อี ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้			
WEIGHT:		SCALE:1:1		DWG NO.		Dgasket		A4	
SHEET 1 OF 1									

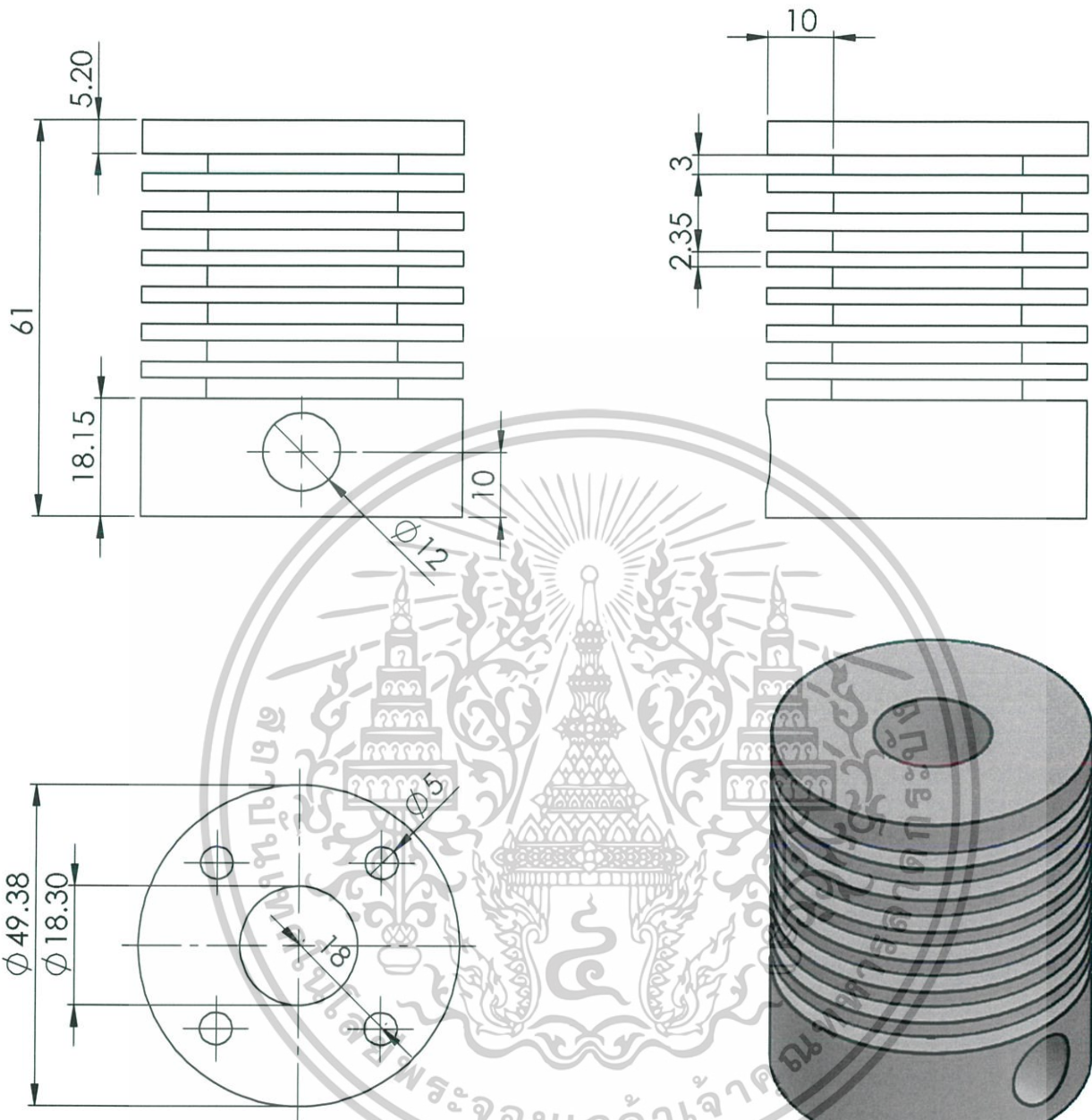


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHKD		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
APPVD		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
MFG		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
Q.A		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
						DWG NO.		A4	
						SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1	
						Psurface			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

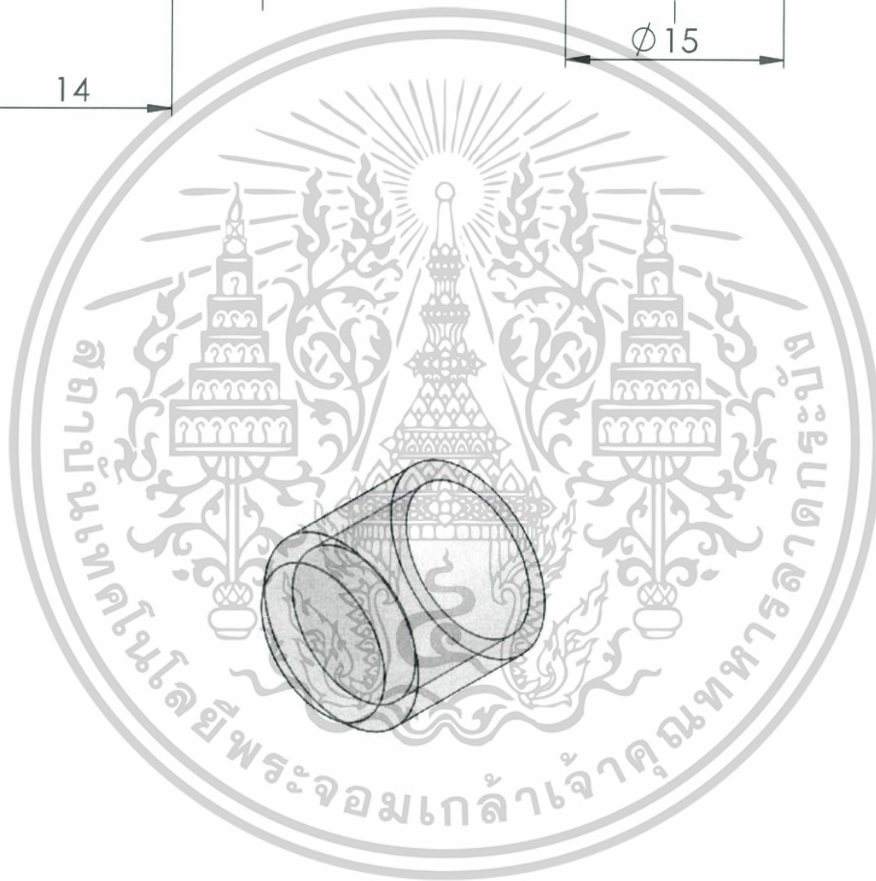
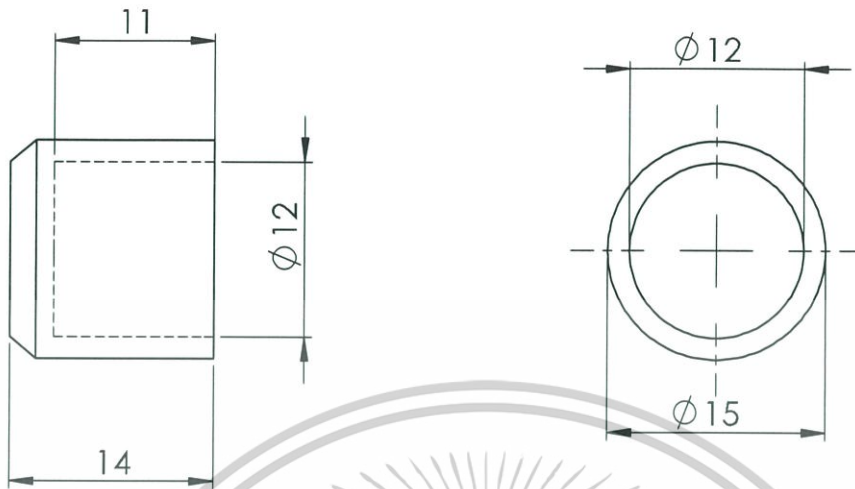


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHKD		SIGNATURE		DATE		ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า			
APPVD		SIGNATURE		DATE		ไม่ว่าวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้			
MFG		SIGNATURE		DATE		MATERIAL:		DWG NO.	
Q.A		SIGNATURE		DATE		MATERIAL:		Ppiston	
WEIGHT:		SIGNATURE		DATE		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1	
WEIGHT:		SIGNATURE		DATE		SCALE:2:1		A4	

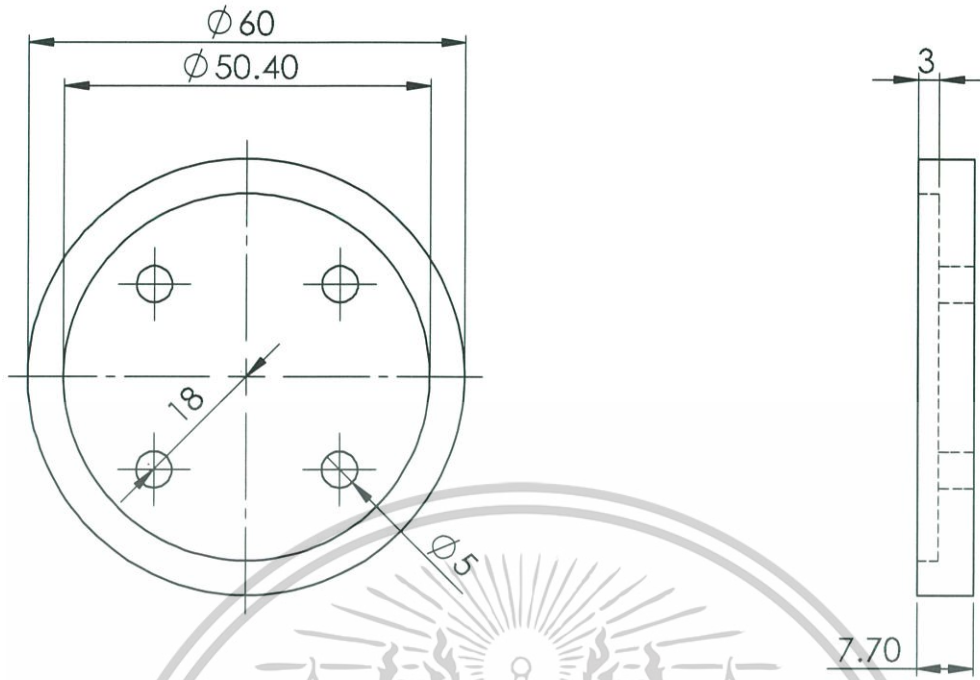


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN			SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D			SIGNATURE		DATE		TITLE:			
APPVD			SIGNATURE		DATE		TITLE:			
MFG			SIGNATURE		DATE		TITLE:			
Q.A.			SIGNATURE		DATE		TITLE:			
WEIGHT:			MATERIAL:		DWG NO.		Pheatsink		A4	
SCALE:1:1			SHEET 1 OF 1							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเปิดเผยถึงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D				ชื่อสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า							
APP'VD				ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้							
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		Pglass	
										A4	
						WEIGHT:		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

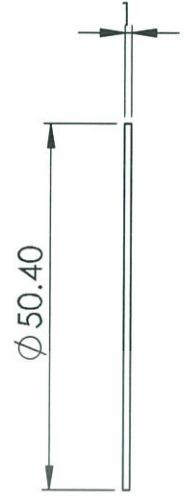
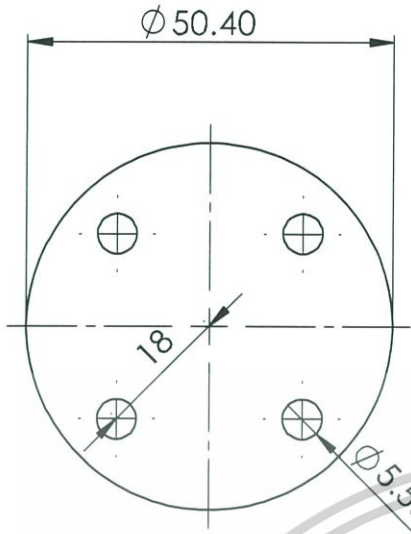
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN		
CHKD		
APPVD		
MFG		
Q.A		
MATERIAL:		
WEIGHT:		

TITLE:	
DWG NO.	Pbutch
SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1
	A4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

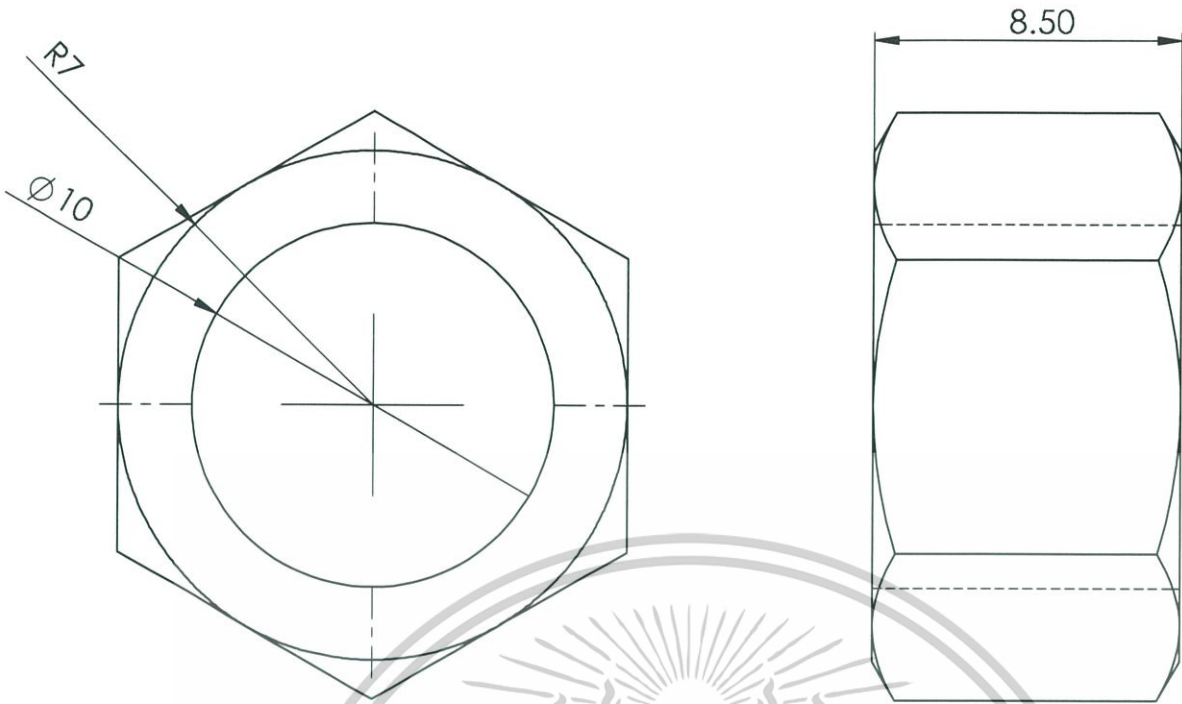
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

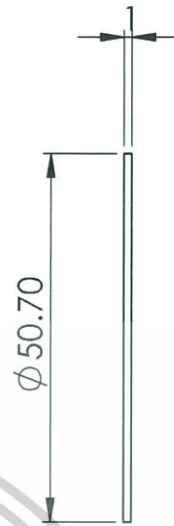
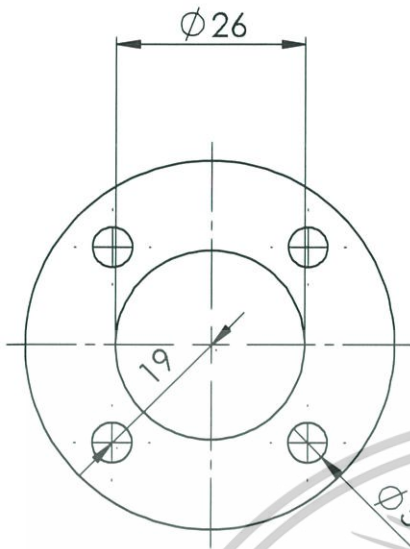
NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN					
CHK'D					
APPVD					
MFG					
Q.A					

TITLE:	
DWG NO.	Pgasket
SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1
WEIGHT:	
	A4

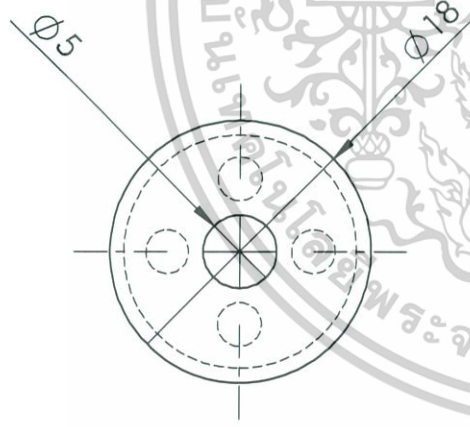
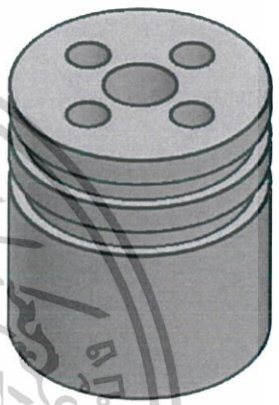
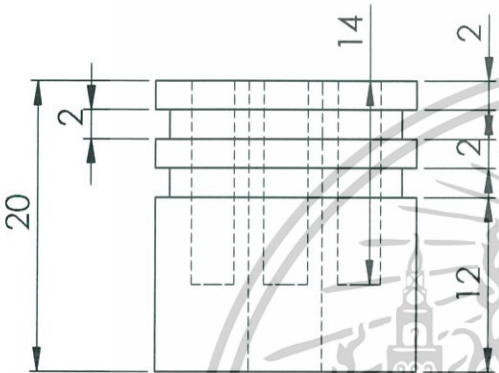
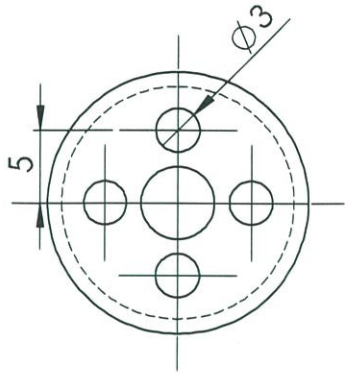
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



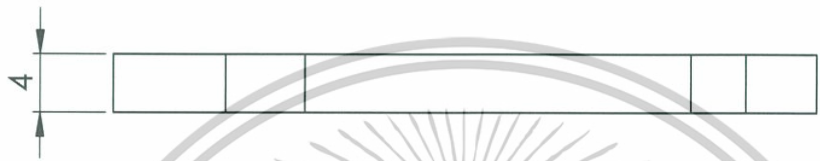
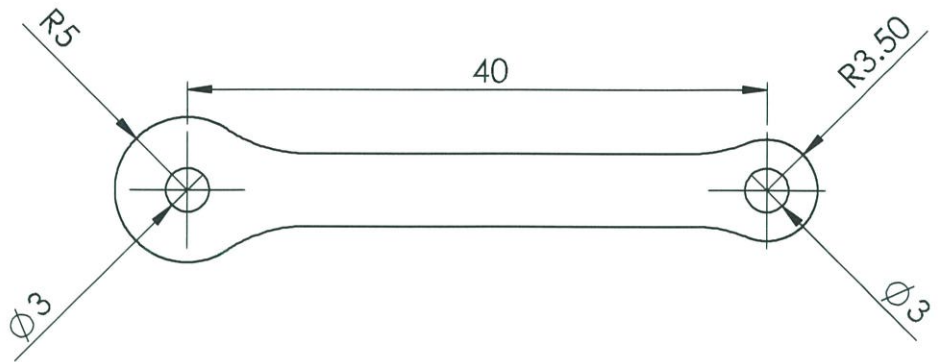
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHKD		SIGNATURE		DATE		เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า			
APPVD		SIGNATURE		DATE		ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้			
MFG		SIGNATURE		DATE		MATERIAL:		DWG NO.	
Q.A		SIGNATURE		DATE		MATERIAL:		Nut	
Q.A		SIGNATURE		DATE		MATERIAL:		A4	
Q.A		SIGNATURE		DATE		WEIGHT:		SCALE:5:1	
Q.A		SIGNATURE		DATE		WEIGHT:		SHEET 1 OF 1	



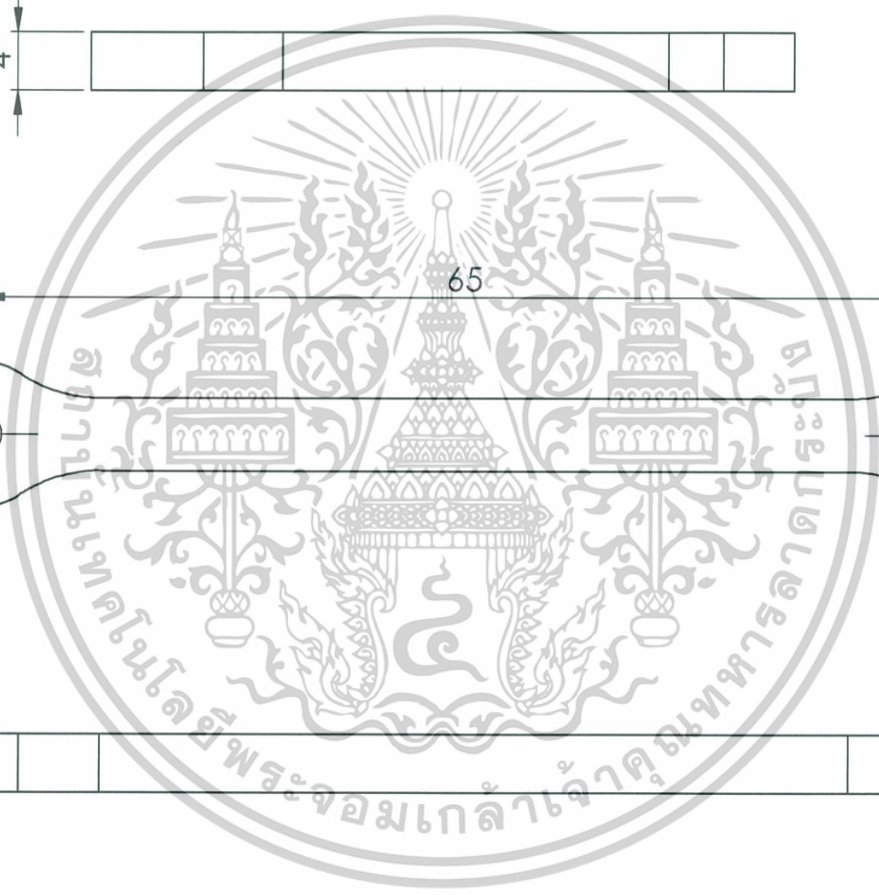
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D		SIGNATURE		DATE		เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า			
APPVD		SIGNATURE		DATE		ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยี่ ทั้งทำละมิให้ตัดแหล่งเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้			
MFG		SIGNATURE		DATE		MATERIAL:		DWG NO.	
Q.A		SIGNATURE		DATE		MATERIAL:		Hgasket	
		SIGNATURE		DATE		WEIGHT:		SCALE:1:1	
		SIGNATURE		DATE		WEIGHT:		SHEET 1 OF 1	
		SIGNATURE		DATE		WEIGHT:		A4	

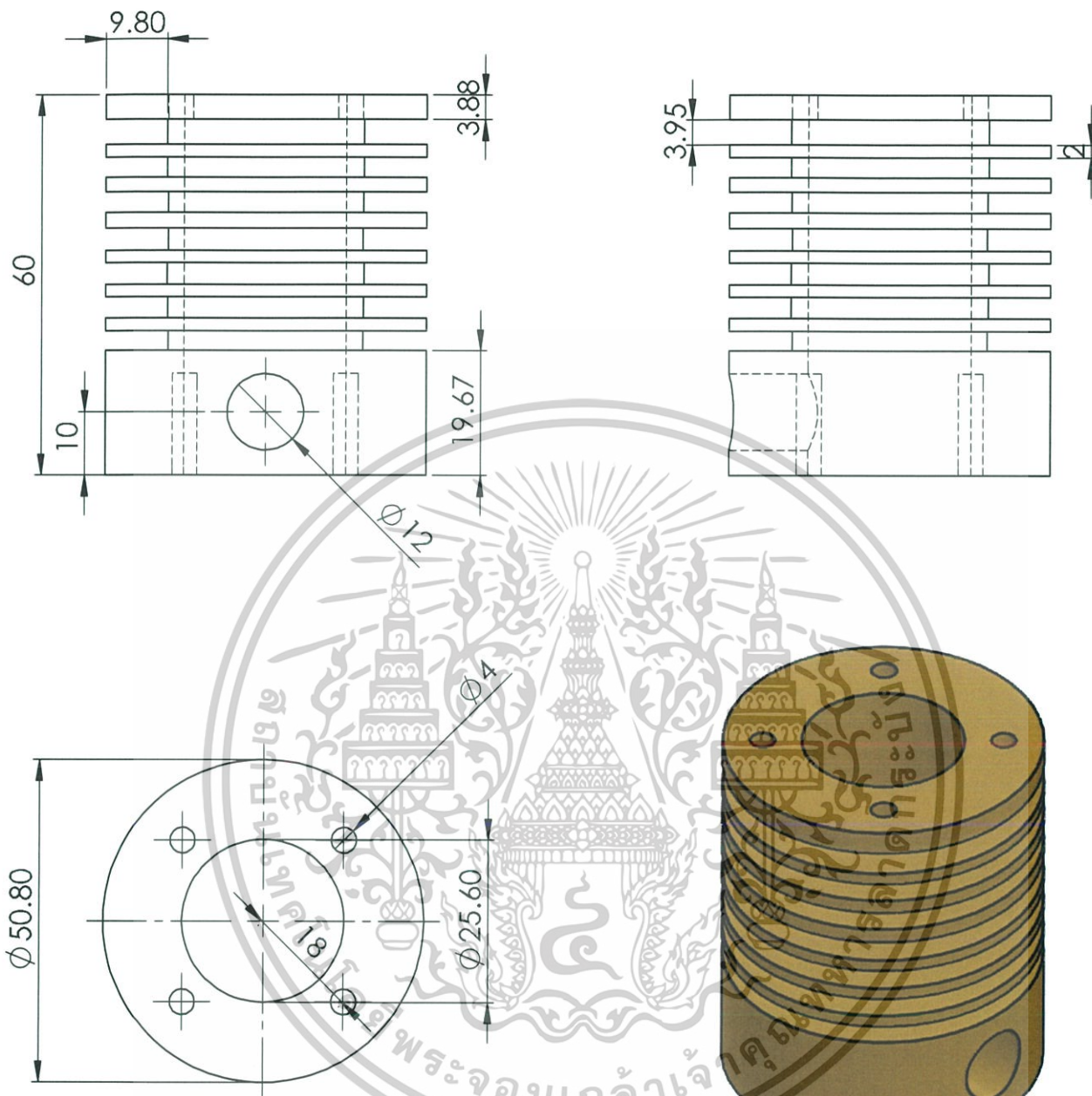


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHKD				เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า							
APPVD				ไม่พาดพิงใดๆ ทั้งสิ้น ยี่ ทั้งห้าให้มีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้							
MFG				MATERIAL:		DWG NO.		Displacer piston core (real)			
Q.A				WEIGHT:		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1			



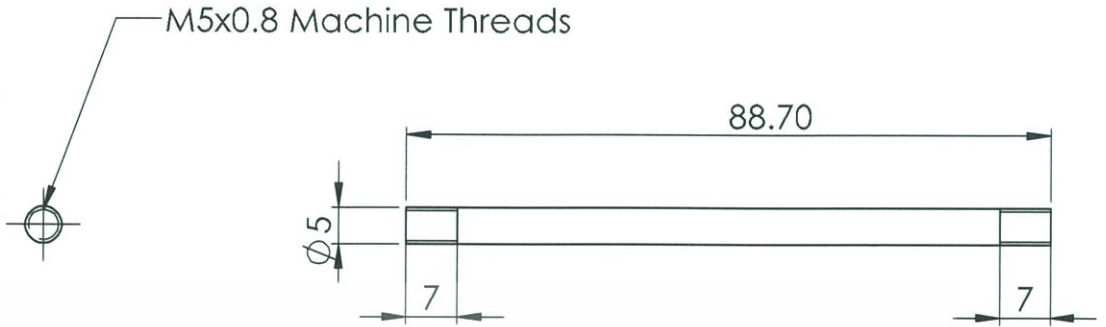
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D				SIGNATURE		DATE		ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า			
APPV'D				SIGNATURE		DATE		ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้			
MFG				SIGNATURE		DATE		Rod			
Q.A.				SIGNATURE		DATE		MATERIAL:		DWG NO.	
				SIGNATURE		DATE		WEIGHT:		SCALE:2:1	
				SIGNATURE		DATE				SHEET 1 OF 1	





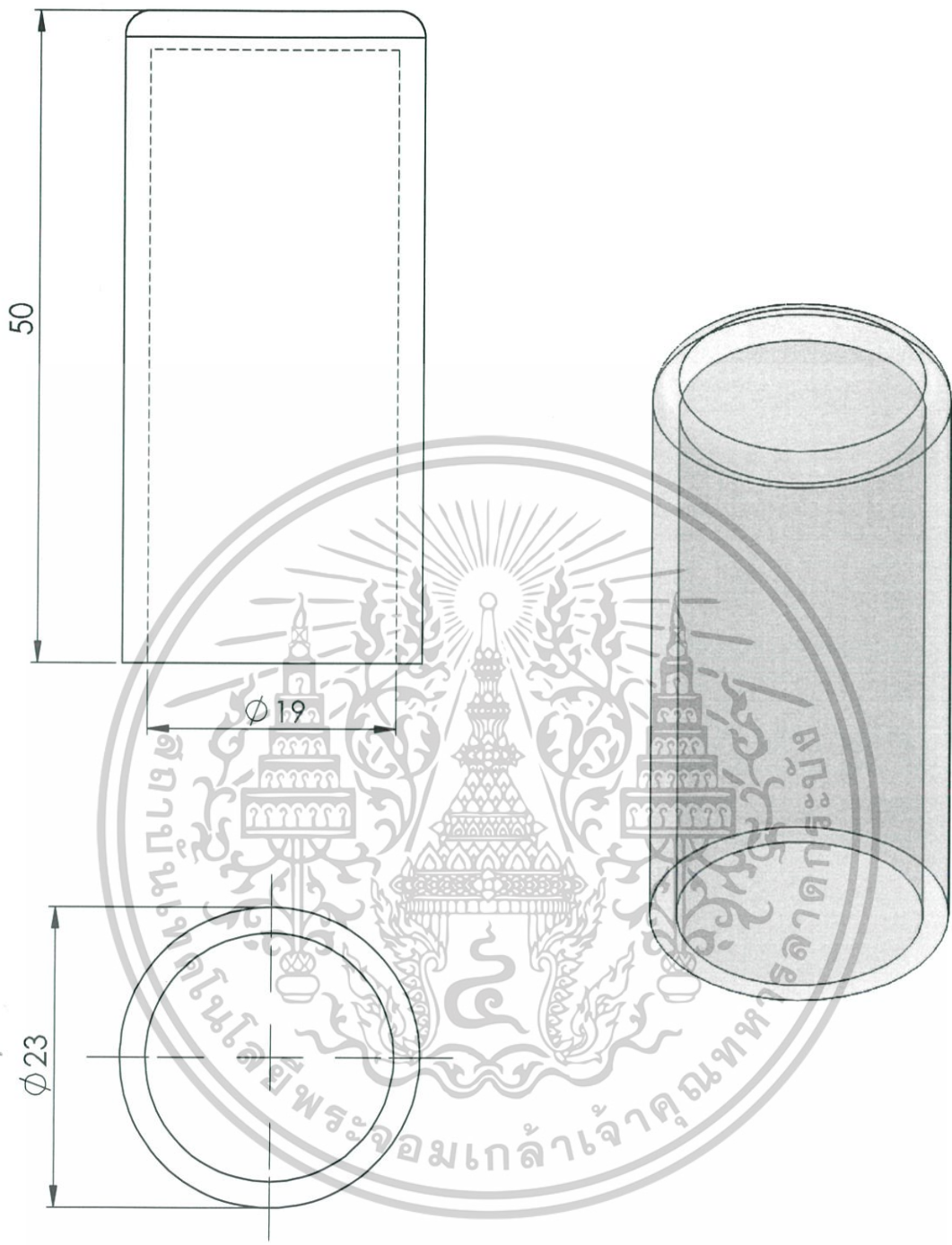
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
APPVD		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
MFG		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
Q.A		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
		MATERIAL:				DWG NO.		Dheatsink	
		WEIGHT:				SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	
								A4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สิ้น ยี่ พังทำ เหม ให้ตัด แผล ลง เนื้อ หา และ ต้อง อ่าง อิง ถึง เจ้า ของ เอกสาร ทุก ครั้ง ที่ มี การ นำ ไป ใช้

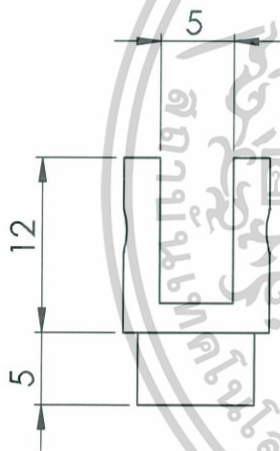
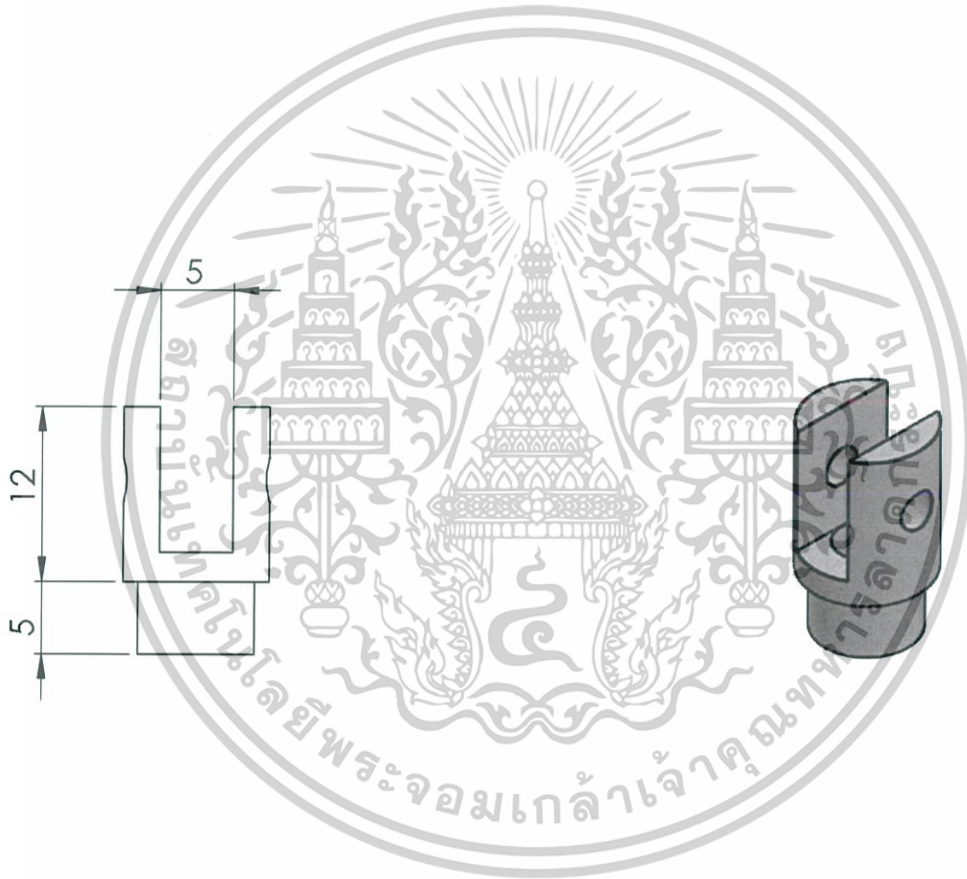
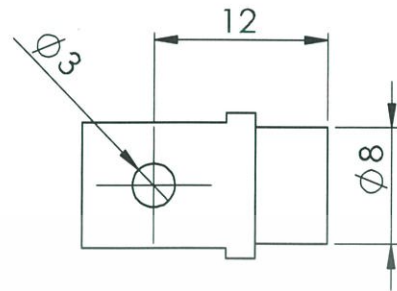
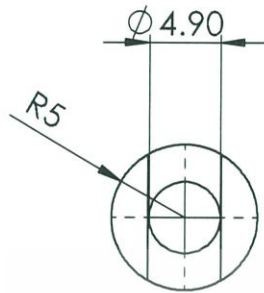


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
APPVD		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
MFG		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
Q.A		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
				MATERIAL:		DWG NO.		Dcore	
				WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	
								A4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยี่ พึ่งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D		เอกสาร		เป็นเอกสาร		ที่ส่งงานไว้สำหรับ		การจ้างงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า	
APPV'D		ไม่		การแก้ไขใดๆ		ทั้งสิ้น ยี่		ทั้งห้าให้มีให้ชัดเจนลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	
MFG		Q.A		MATERIAL:		DWG NO.		DGlass	
WEIGHT:		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1		A4			



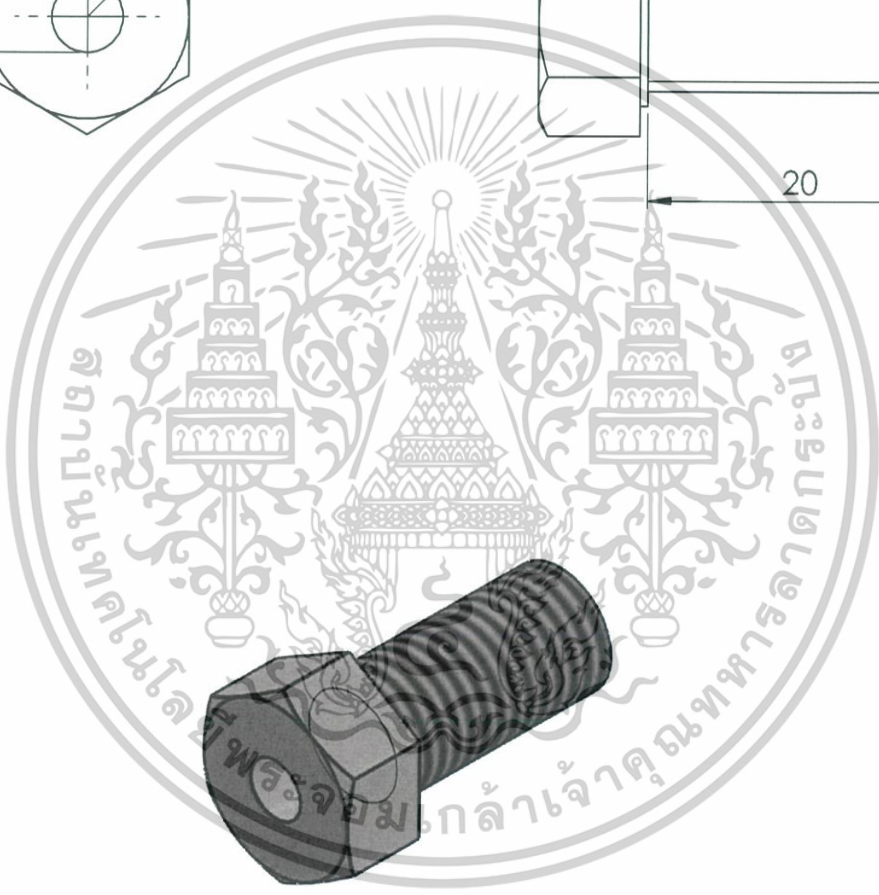
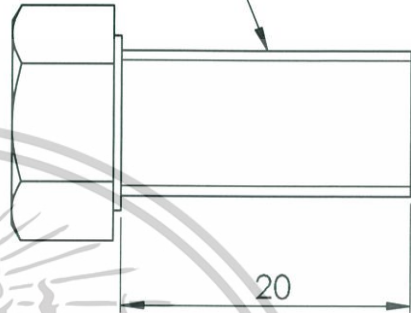
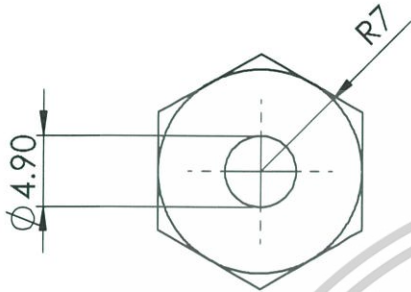
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
APP'VD		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
MFG		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
Q.A		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
				MATERIAL:		DWG. NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE:5:1		SHEET 1 OF 1	

Connector

A4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สิ้น ยี่ พังห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

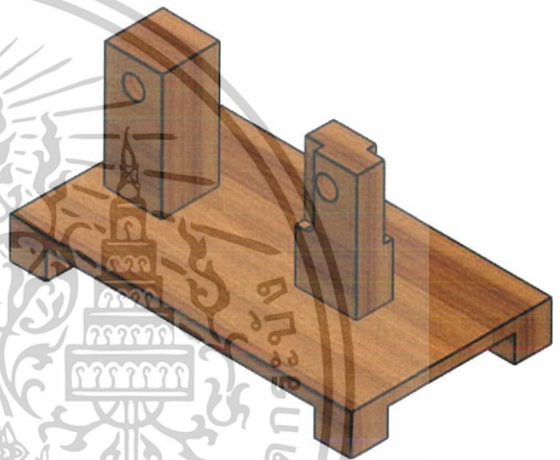
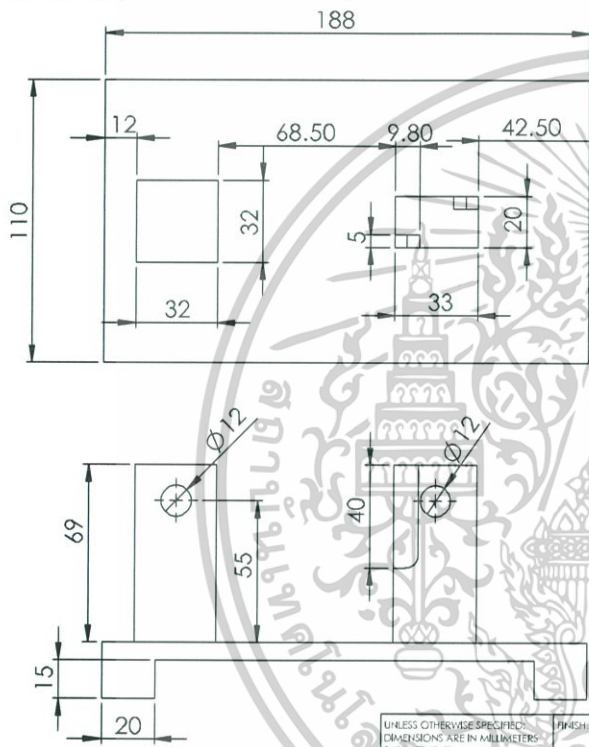
M10x1.25 Machine Threads



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
APPVD		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
MFG		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
Q.A		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
				MATERIAL:		DWG NO.		Bolt	
				WEIGHT:		SCALE:2:1			
								SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สิ้น ยี่สิบห้า ให้ตัดแบ่งลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A4



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:											
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE	
CHK'D											
APP'VD											
MFG											
Q.A.								MATERIAL		DWG NO.	
										Base	
								WEIGHT:		SCALE 1:2	
										SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D		SIGNATURE		DATE		Air pipe drawing			
APPVD		SIGNATURE		DATE		DWG NO.			
MFG		SIGNATURE		DATE		SCALE:1:1			
Q.A		SIGNATURE		DATE		SHEET 1 OF 1			
MATERIAL:		WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ทำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยี่ ทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A4