

การออกแบบและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อตุนกำลังคู่
ชนิดแกมมาโดยใช้หลักความต่างอุณหภูมิของกระบอกสูบ
DESIGN AND DEVELOPMENT OF TWIN FLYWHEELS
GAMMA TYPE STIRLING ENGINE BY USING
TEMPERATURE DIFFERENCE METHOD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การออกแบบและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อตุนกำลังคู่
ชนิดแกมมาโดยใช้หลักความต่างอุณหภูมิของกระบอกสูบ
DESIGN AND DEVELOPMENT OF TWIN FLYWHEELS
GAMMA TYPE STIRLING ENGINE BY USING
TEMPERATURE DIFFERENCE METHOD



T149470



นิสิต พิลักษณ์
นพพล ล้วนทองเหลือง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149470
วันเดือนปี 8 ธ.ค. 2561

b. 12884753
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF TWIN FLYWHEELS
GAMMA TYPE STIRLING ENGINE BY USING
TEMPERATURE DIFFERENCE METHOD



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 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การออกแบบและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อตุนกำลังคู่ชนิด
แกมมาโดยใช้หลักความต่างอุณหภูมิของกระบอกสูบ

Design and Development of Twin Flywheels Gamma
Type Stirling Engine by Using Temperature Difference
Method

ชื่อนักศึกษา

นาย นิสิต พิลาชัย

รหัสนักศึกษา 56051159

นาย นพพล ล้วนทองเหลือง

รหัสนักศึกษา 56051155

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กฤษกร โส้เจริญรัตน์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ	
รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การออกแบบและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อตุนกำลังคู่ชนิดแกมมาโดยใช้หลักความต่างของอุณหภูมิกระบอกสูบ	
ชื่อนักศึกษา	นายนิสิต พิลาชัย	รหัสนักศึกษา 56051159
	นายนพพล ลั่นทองเหลือง	รหัสนักศึกษา 56051155
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษเล่มนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อตุนกำลังคู่ชนิดแกมมา โดยอาศัยหลักความต่างอุณหภูมิของกระบอกสูบ วัสดุที่ใช้ในการผลิตเครื่องยนต์ประกอบไปด้วย ไม้ทองเหลือง เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม และแก้ว โดยออกแบบให้เครื่องยนต์มีวัสดุของฮีตซิงค์ของกระบอกสูบทั้งสองที่ต่างกันโดยใช้ทองเหลืองที่ฮีตซิงค์ดิสเพลสเซอร์และอะลูมิเนียมที่ฮีตซิงค์กำลังและออกแบบให้เครื่องยนต์มีค่าอัตราส่วนกำลังอัดที่ 2.5 โดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงานและใช้วัสดุในการทำฮีตซิงค์ของกระบอกสูบทั้งสองที่ต่างกันในการออกแบบเครื่องยนต์จะใช้โปรแกรมออกแบบชิ้นงานสามมิติ SolidWorks รวมทั้งทำการวิเคราะห์การไหลของอากาศภายในเครื่องยนต์เมื่อทดสอบเครื่องยนต์ที่ผลิตออกมาแล้วพบว่าเครื่องยนต์มีเวลาเริ่มต้นทำงาน 2.30 นาที และมีเวลาในการทำงานสูงสุด 40 นาที กำลังขาออกของเครื่องยนต์อยู่ที่ 715 มิลลิวัตต์ที่รอบการทำงานสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ 599 รอบต่อนาที โดยเครื่องยนต์ที่ผลิตและออกแบบมานั้นมีประสิทธิภาพทางความร้อน 40 เปอร์เซ็นต์ และผลการวิเคราะห์ของไหลภายในเครื่องยนต์พบว่าที่เวลาเริ่มต้นทำงานของเครื่องยนต์ 2.30 นาที พบว่าอากาศภายในกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และกำลังมีอุณหภูมิ 621 เคลวิน และ 300 เคลวินตามลำดับ โดยมีความต่างอุณหภูมิของกระบอกสูบ 321 เคลวิน

คำสำคัญ : เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา อัตราส่วนกำลังอัด ความต่างอุณหภูมิ การออกแบบ

Title	Design and Development of Twin Flywheels Gamma Type Stirling Engine by Using Temperature Difference Method	
Students	Mr. Nisit Pilachai	Student ID 56051159
	Mr. Nopphon Lanthongluang	Student ID 56051155
Degree	Bachelor of Science (Applied physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2016	
Advisor	Assoc.Prof.Sarai Lekchaum	

Abstract

This special project is design and development of twin flywheels gamma type Stirling engine by using compression ratio. 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 and simulating flowing of working fluid inside cylinders. After test the fabricated engine, maximum power in one cycle was obtain at 599 rpm as 715 mW. Maximum operating time of the engine is 40 minute with 2.30 minute initial time. 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 621 Kelvin and 300 Kelvin, respectively. And temperature difference between both cylinders is 321 Kelvin.

Keywords: Gamma type Stirling engine, compression ratio, Temperature difference, Designing

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำจากรองศาสตราจารย์สาหร่าย เล็กชะอุ่มที่คอยเป็นที่ปรึกษาทั้งในด้านวิชาการและด้านกาทำงาน ทำให้ผู้จัดทำสามารถนำคำแนะนำมาปรับใช้ในการทำงานได้ และขอขอบพระคุณคณะกรรมการ สอบ ผศ.ดร.กฤษกร โส้เจริญรัตน์ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรสและดร.วิฑูรย์ ยินดีสุขที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆทำให้โครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณนายทองทศ แก้วกล้า นายสมพงษ์ สุทธิอาจและพี่ๆพนักงานหน่วยผลิตอุปกรณ์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเขื่อนอุบลรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำเทคนิควิธีการใช้เครื่องมือในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอย่างถูกวิธี

ขอขอบพระคุณอาจารย์สำโรจน์ ชูอำไพและอาจารย์ประจำตึกซ่อมสร้างคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ให้การสนับสนุนสถานที่ในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง รวมทั้งช่วยแก้ไขปัญหาและให้คำแนะนำแก่ผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณนายคณิงชาติ แสนยศที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือทางด้านเทคนิคต่างๆ ในการสร้างและประกอบเครื่องยนต์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้ทำงาน

ขอขอบพระคุณบิดาและมารดาที่คอยสนับสนุนทั้งทางด้านกำลังทรัพย์และกำลังใจให้นักศึกษาสามารถทำโครงการพิเศษเล่มนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นิสิต พิลาชัย

นพพล ล้านทองเหลือง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง	3
2.1.1 สภาวะและสมดุล	3
2.1.2 เครื่องยนต์สันดาปภายนอก	4
2.1.3 กระบวนการและวัฏจักร	4
2.1.4 กฎทางอุณหพลศาสตร์	6
2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิง	6
2.2.1 วัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling Cycle) ในทางอุดมคติ	7
2.2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิงที่มีรีเจนเนอเรเตอร์	8
2.3 ส่วนประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	10
2.4 การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์	12
2.5 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	17
2.5.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)	17
2.5.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)	19
2.5.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)	20
2.6 ทฤษฎีทางวัสดุศาสตร์	21
2.6.1 ทองเหลือง (Brass)	22
2.6.2 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)	24
2.6.3 อะลูมิเนียม (Aluminum)	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
2.7.1 การพัฒนาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	28
2.7.2 การเพิ่มประสิทธิภาพกลไกของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	28

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	28
3.1 การศึกษาส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาต้นแบบ	28
3.1.1 กระจกสูบดิสเพลสเซอร์	30
3.1.2 กระจกสูบกำลัง	31
3.1.3 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์และแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์	31
3.1.4 ลูกสูบกำลัง	32
3.1.5 ข้อเหวี่ยง	32
3.1.6 ล้อตุนกำลัง	33
3.1.7 ท่ออากาศ	33
3.2 การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาโดยใช้โปรแกรม SolidWorks	34
3.2.1 กระจกสูบดิสเพลสเซอร์	38
3.2.2 กระจกสูบกำลัง	50
3.2.3 ท่ออากาศ	59
3.2.4 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์	63
3.2.5 ลูกสูบกำลัง	77
3.2.6 ข้อเหวี่ยง	81
3.2.7 ล้อตุนกำลัง	83
3.2.8 ฐาน	89
3.3 การใช้โปรแกรม SolidWorks ในการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง	100
3.3.1 การตั้งค่าโปรแกรมในการวิเคราะห์ของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์	100
3.4 เครื่องมือในการสร้างและการวัดผลเพื่อวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง	109
3.4.1 เครื่องมือในการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	109
3.4.2 เครื่องมือในการวัดผลเพื่อการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง	112
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	115
4.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์	115
4.1.1 ผลการทำงานของเครื่องยนต์	117
4.1.2 การวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์	125
4.2 การวิเคราะห์ของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	136
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	138
5.1 ผลการวิจัย	138
5.2 ข้อเสนอแนะ	139
เอกสารอ้างอิง	140
ภาคผนวก	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงค่าสภาพการนำความร้อนที่อุณหภูมิห้องของวัสดุต่างๆ	18
2.2 คุณสมบัติของอะลูมิเนียม	26
3.1 การดำเนินการวิจัย	28
4.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์	116
4.2 ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์	117
4.2 ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์(ต่อ)	118
4.2 ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์(ต่อ)	119
4.2 ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์(ต่อ)	120
4.2 ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์(ต่อ)	121
4.2 ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์(ต่อ)	122
4.2 ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์(ต่อ)	123
4.2 ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์(ต่อ)	124
4.3 ตารางแสดงปริมาตรของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ	128
4.3 ตารางแสดงปริมาตรของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ(ต่อ)	129
4.4 ปริมาตรต่างๆภายในเครื่องยนต์และอุณหภูมิของกระบอกสูบที่รอบการทำงานสูงสุด	130
4.5 ความดันภายในระบบและปริมาตรขยายที่ค่ามุมข้อเหวี่ยงต่างๆ	133

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นทางของกระบวนการระหว่างสถานะที่ 1 และสถานะที่ 2 ระหว่างความดันกับปริมาตร	4
2.2 ลักษณะการเกิดกระบวนการแบบ quasi – equilibrium และ nonquasi – equilibrium	5
2.3 Isometric heating process	7
2.4 Isothermal expansion process	7
2.5 Isometric cooling process	8
2.6 Isothermal compression process	8
2.7 แผนภาพ P-V ของวัฏจักรคาร์โนต์และวัฏจักรสเตอร์ลิง	8
2.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	10
2.9 แสดงโครงสร้างและตำแหน่งตำแหน่งของระยะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	12
2.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรพื้นที่การขยายและการบีบอัดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	14
2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงที่เปลี่ยนแปลงกับปริมาตรรวม (V) และความดัน (P) ภายในระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่เปลี่ยนแปลงไป	14
2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรวม (V) กับความดัน (P) ภายในระบบเครื่องยนต์	15
2.13 การนำความร้อนผ่านแผ่นหินความหนา Δx และพื้นที่	17
2.14 การพาความร้อนจากพื้นผิวร้อน	19
2.15 ทองเหลือง (Brass)	22
2.16 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless)	24
2.17 อะลูมิเนียม (Aluminum)	27
3.1 องค์ประกอบต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	29
3.2 กระจกสูบดิสเพลสเซอร์ (4)	30
3.3 กระจกสูบกำลัง (3)	31
3.4 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (2) และแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (8)	31
3.5 ลูกสูบกำลัง (1)	32
3.6 ข้อเหวี่ยง (8, 12)	32
3.7 ล้อตุนกำลัง (10)	33
3.8 ท่ออากาศ (11)	33
3.9 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (1)	34
3.10 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (2)	34
3.11 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (3)	35
3.12 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (4)	36
3.13 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (5)	36
3.14 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (6)	37
3.15 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (7)	38
3.16 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (8)	38
3.17 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (9)	39
3.18 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (10)	39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (11)	40
3.20 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (12)	40
3.21 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (13)	41
3.22 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (14)	41
3.23 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (15)	42
3.24 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (16)	42
3.25 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (17)	43
3.26 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (18)	43
3.27 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (19)	44
3.28 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (20)	44
3.29 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (21)	45
3.30 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (22)	45
3.31 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (23)	46
3.32 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (24)	46
3.33 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (25)	47
3.34 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (26)	47
3.35 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (27)	48
3.36 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (28)	48
3.37 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (29)	49
3.38 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (30)	49
3.39 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (31)	50
3.40 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (32)	50
3.41 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (33)	51
3.42 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (34)	51
3.43 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (35)	52
3.44 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (36)	52
3.45 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (37)	53
3.46 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (38)	53
3.47 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (39)	54
3.48 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (40)	54
3.49 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (41)	55
3.50 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (42)	55
3.51 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (43)	56
3.52 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (44)	56
3.53 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (45)	57
3.54 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (46)	57

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.55 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (47)	58
3.56 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (48)	58
3.57 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (49)	59
3.58 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (50)	59
3.59 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (51)	60
3.60 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (52)	60
3.61 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (53)	61
3.62 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (54)	61
3.63 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (55)	62
3.64 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (56)	62
3.65 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (57)	63
3.66 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (58)	63
3.67 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (59)	64
3.68 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (60)	64
3.69 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (61)	65
3.70 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (62)	65
3.71 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (63)	66
3.72 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (64)	66
3.73 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (65)	67
3.74 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (66)	67
3.75 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (67)	68
3.76 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (68)	68
3.77 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (69)	69
3.78 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (70)	69
3.79 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (71)	70
3.80 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (72)	70
3.81 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (73)	71
3.82 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (74)	71
3.83 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (75)	72
3.84 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (76)	72
3.85 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (77)	73
3.86 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (78)	73
3.87 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (79)	74
3.88 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (80)	74
3.89 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (81)	75
3.90 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (82)	75

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.91 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (83)	76
3.92 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (84)	76
3.93 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (85)	77
3.94 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (86)	77
3.95 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (87)	78
3.96 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (88)	78
3.97 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (89)	79
3.98 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (90)	89
3.99 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (91)	80
3.100 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (92)	80
3.101 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (93)	81
3.102 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (94)	81
3.103 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (95)	82
3.104 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (96)	82
3.105 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (97)	83
3.106 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (98)	83
3.107 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (99)	84
3.108 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (100)	84
3.109 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (101)	85
3.110 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (102)	85
3.111 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (103)	86
3.112 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (104)	86
3.113 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (105)	87
3.114 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (106)	87
3.115 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (107)	88
3.116 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (108)	88
3.117 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (109)	89
3.118 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (110)	89
3.119 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (111)	90
3.120 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (112)	90
3.121 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (113)	91
3.122 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (114)	91
3.123 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (115)	92
3.124 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (116)	92
3.125 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (117)	93
3.126 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (118)	93

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.127 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (119)	94
3.128 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (120)	94
3.129 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (1)	95
3.130 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (2)	95
3.131 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (3)	96
3.132 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (4)	96
3.133 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (5)	97
3.134 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (6)	97
3.135 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (7)	98
3.136 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (8)	98
3.137 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (9)	99
3.138 ชิ้นงานสามมิติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	99
3.139 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (121)	100
3.140 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (122)	100
3.141 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (123)	101
3.142 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (124)	101
3.143 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (125)	102
3.144 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (126)	102
3.145 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (127)	103
3.146 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (128)	103
3.147 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (129)	104
3.148 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (130)	104
3.149 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (131)	105
3.150 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (132)	105
3.151 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (133)	106
3.152 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (134)	106
3.153 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (135)	107
3.154 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (136)	107
3.155 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (137)	108
3.156 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (138)	108
3.157 เครื่องกลึง (Manual lathe)	109
3.158 การสร้างล้อตุนกำลังโดยใช้เครื่องกลึง (Manual lathe)	109
3.159 เครื่องกัด (Milling machine)	110
3.160 การกัดชิ้นงานข้อเหวี่ยง	110
3.161 เครื่องเจาะ (Drilling machine)	111
3.162 เลื่อยตัดเหล็ก (Chain saw)	111

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.163 เครื่องตัดแก้ว (Glass cutter)	112
3.164 การวัดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์	112
3.165 เทอร์โมมิเตอร์ FLUKE รุ่น 54-2B และเทอร์โมคัปเปิล FLUKE 80pk-26 รุ่น	113
3.166 เครื่องวัดความเร็วรอบ Lutron รุ่น DT-2236	113
3.167 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	114
4.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อตุ่นกำลังคู่ชนิดแกมมา	125
4.2 แสดงปริมาตรและระยะต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	125
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรขยายและปริมาตรบีบอัดกับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์	129
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรวมกับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์	130
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในเครื่องยนต์ปริมาตรขยาย	134
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในเครื่องยนต์ปริมาตรรวม	134
4.7 ผลการวิเคราะห์ของไหลทำงานของเครื่องยนต์	136
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบริเวณที่วัดอุณหภูมิผิวของโลหะกับเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์	136

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}	ปริมาตรการกวาดของลูกสูบกำลัง
W_C	งานที่เกิดจากการอัดตัวของสารทำงาน
W_E	งานที่เกิดจากการขยายตัวของสารทำงาน
χ_s	อัตราส่วนของปริมาตรกวาด
a	ความยาวด้านท้ายของกระบอกสูบกำลัง
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน
h_r	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน
\bar{h}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
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
$d_{rod,d}$	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูดข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์
$d_{rod,p}$	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูดข้อเหวี่ยงกำลัง
$d_{out,ht}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฮีตเตอร์
$d_{out,hs}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฮีตซิงค์
$d_{out,tube}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่ออากาศ
d_{wheel}	เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อตุนกำลัง
l_d	ความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
$l_{Cy,d}$	ความยาวของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์
$l_{Cy,p}$	ความยาวของกระบอกสูบกำลัง
$l_{core,d}$	ความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
l_{hs}	ความยาวของฮีตซิงค์
l_{ht}	ความยาวของฮีตเตอร์
$l_{rod,d}$	ระยะระหว่างรูดข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์
$l_{rod,p}$	ระยะระหว่างรูดข้อเหวี่ยงกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
l_{tube}	ความยาวของท่ออากาศ
l_{wheel}	ความหนาของล้อตุนกำลัง
l_{dis}	ความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
l_p	ความยาวของลูกสูบกำลัง
y_p	ความยาวของปริมาตรตายของกระบอกลูกสูบกำลัง
y_0	ระยะชักของลูกสูบดิสเพลสเซอร์
$V_{Cy,p}$	ปริมาตรภายในกระบอกลูกสูบกำลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงปีละ 1,200 เมกะวัตต์ต่อปี โดยโรงไฟฟ้าที่ใช้ผลิตไฟฟ้าในประเทศมีการใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติถึงร้อยละ 70 รองลงมาได้แก่ ลิกไนท์ และถ่านหินรวมประมาณร้อยละ 20 ที่เหลือเป็นพลังงานหมุนเวียนและการซื้อไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน ด้วยสาเหตุข้างต้นจึงทำให้มีการศึกษาทางด้านพลังงานทดแทน โดยพลังงานทดแทนนั้นมีหลายประเภททั้ง พลังงานลม พลังงานน้ำและพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถูกประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1816 โดย Robert Sterling ซึ่งจัดเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้กลายเป็นพลังงานกลโดยอาศัยคุณสมบัติของแก๊สโดยเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้แก๊สเกิดการขยายตัวและจะหดตัวลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง (Charles' Law) ซึ่งเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นมีลักษณะเป็นกระบอกสูบที่มีอากาศหรือแก๊สทำงานอยู่ด้านในจึงทำให้เมื่อแก๊สได้รับความร้อนจะส่งผลทำให้ความดันมีค่าเพิ่มขึ้นและจะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลงแสงอาทิตย์ ซึ่งทางภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้มีการศึกษาวิจัยพลังงานทดแทนชนิดต่างๆรวมทั้งการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่ใช้เชื้อเพลิงจากพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงและแสงอาทิตย์ โดยได้มีการออกแบบเครื่องยนต์และปรับปรุงแก้ไขปัญหาต่างๆมาแล้ว 6 รุ่น ซึ่งปัญหาของเครื่องยนต์รุ่นที่ 6 ที่พบก็คือเครื่องยนต์มีเวลาในการทำงานที่น้อย จึงทำให้การนำเครื่องยนต์ไปใช้ประโยชน์จริงนั้นทำได้ยาก อีกทั้งเมื่อทำการถอดประกอบเพื่อบำรุงรักษาแล้วประกอบเครื่องยนต์กลับเหมือนเดิมพบว่าเครื่องยนต์ไม่ทำงานจึงทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

โครงการพิเศษเล่มนี้ได้ทำการออกแบบเครื่องยนต์โดยอาศัยหลักความต่างความร้อนของกระบอกสูบและหลักอัตราส่วนกำลังอัดเพื่อแก้ปัญหาของเวลาการทำงานที่น้อยของเครื่องยนต์รุ่นที่ 6 และใช้เป็นหลักในการตั้งค่าเครื่องยนต์ให้ทำงานเมื่อทำการถอดประกอบเครื่องยนต์เพื่อซ่อมบำรุงเครื่องยนต์ โดยนำหลักการนำความร้อนของวัสดุ (Heat conduction) และการวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics analysis) ในส่วนของหลักอัตราส่วนกำลังอัดมาปรับใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทำงานของเครื่องยนต์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบและผลิตเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาล้อยูนกำลังคู่
- 2) เพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา
- 2) ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา
- 3) ศึกษาและวัดสมรรถนะของเครื่องยนต์
- 4) วิเคราะห์เครื่องยนต์ที่ได้ออกแบบและผลิตขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เรียนรู้ด้านเครื่องกล, การใช้เครื่องมือต่างๆ ในด้านการผลิตและการวัดผลต่างๆ
- 2) ได้ความรู้ทางด้านอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) และกลศาสตร์ (Mechanics)
- 3) ได้เรียนรู้การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าและการปรับใช้ความรู้ในการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัญหาพิเศษเล่มนี้ได้ศึกษาการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อยอนกำลังคู่ โดยได้อ้างอิงบทความวิจัยเรื่องการพัฒนาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา (2.6.1) ที่กล่าวถึงการออกแบบเครื่องยนต์โดยใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ในการออกแบบ และบทความเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพกลไกของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (2.6.2) ที่ศึกษาผลของการปรับสเกลของกลไกต่างๆของเครื่องยนต์เช่น รัศมีข้อเหวี่ยง ความยาวข้อเหวี่ยง เป็นต้น ว่าส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์อย่างไร บทความทั้งสองได้ถูกนำมาปรับใช้ในการออกแบบเครื่องยนต์ รวมทั้งแก้ปัญหาต่างๆที่พบในการทำงานในปัญหาพิเศษเล่มนี้

2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

แรกเริ่มเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ถูกคิดค้นและจดสิทธิบัตรโดย Robert Stirling ในปี 1816 โดยเครื่องยนต์นี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานกลโดยปราศจากกระบวนการทางเคมีหรือของไหลตัวกลางดังเช่นในเครื่องยนต์ไอน้ำ เครื่องยนต์จะเป็นระบบปิดที่มีการสันดาปภายนอก ซึ่งต่างจากเครื่องยนต์สันดาปภายในคือจะไม่มีการแลกเปลี่ยนของไหลทำงานกับสิ่งแวดล้อม โดยที่ของไหลทำงานจะอยู่ในเครื่องยนต์ตลอดอย่างถาวร ของไหลทำงานจะเพียงแลกเปลี่ยนความร้อนกับส่วนที่ร้อนและเย็นภายในเครื่องยนต์ และเกิดการขยายตัว-หดตัวของของไหลทำงาน ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหลดังกล่าว ในปัจจุบันเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและถูกนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งกำเนิดความร้อนหลายชนิด ได้แก่ ความร้อนจากการเผาไหม้กากของเสียต่างๆ น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซมีเทนจากชีวมวลและความร้อนจากแสงอาทิตย์ซึ่งมีความน่าสนใจสำหรับเป็นทางเลือกในการผลิตกระแสไฟฟ้า

2.1.1 สภาวะและสมดุล

สภาวะ (state) หมายถึงสภาพของระบบที่ถูกกำหนดโดยชุดของสมบัติ (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 สภาวะที่ภายในระบบมีความดันเท่ากันทั่วทั้งระบบอย่างไรก็ตามความแตกต่างของความดันในระบบอาจเกิดจากระดับความสูงซึ่งเป็น

ผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วง แต่โดยทั่วไปค่าความแตกต่างจากสาเหตุนี้จะมีค่าต่ำมาก จึงไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา

สมดุลทางเคมี (chemical equilibrium) หมายถึง สภาวะที่ของไหลทำงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี

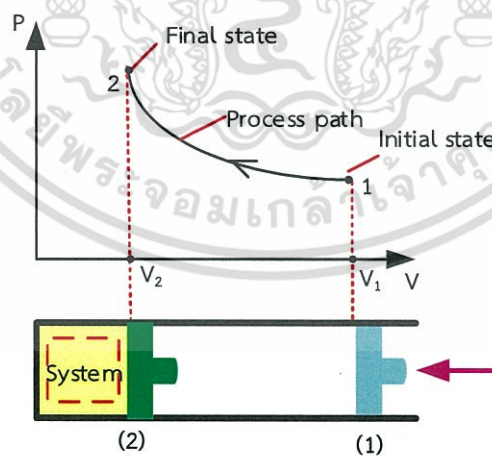
สมดุลเฟส (phase equilibrium) เป็นสมดุลที่ใช้พิจารณาสำหรับระบบที่มีมากกว่า 1 เฟส โดยสมดุลเฟสหมายถึงสภาวะที่มวลในแต่ละเฟสเข้าสู่สมดุลและไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป

2.1.2 เครื่องยนต์สันดาปภายนอก

เครื่องยนต์สันดาปภายนอก (External combustion engine) เป็นเครื่องยนต์ที่นำเอาผลของการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงให้ถ่ายเทความร้อนไปยังของไหลชนิดที่สองซึ่งใช้เป็น สารทำงานสำหรับผลิตกำลัง ดังนั้นสารทำงานและสารที่เกิดจากการเผาไหม้จึงเป็นของไหลคนละชนิด และถูกแยกออกจากกันโดยผนังความร้อน สารที่เกิดจากการเผาไหม้จึงไม่สัมผัสกับชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอกนี้ ได้แก่ เครื่องจักรไอน้ำ (steam engine) กังหันไอน้ำ (steam turbine) และเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling engine)

2.1.3 กระบวนการและวัฏจักร

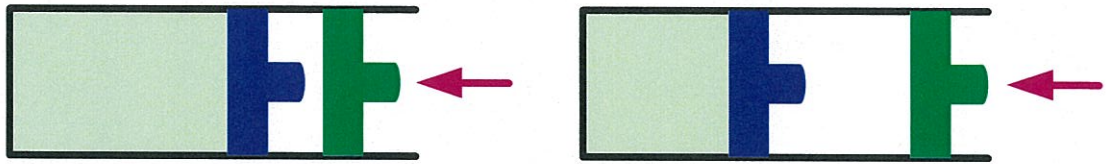
กระบวนการ (processes) คือการเปลี่ยนแปลงของระบบจากสภาวะหนึ่งไปยังอีกสภาวะหนึ่งภายใต้การขยายตัวหรือการอัดตัวของของไหลทำงานในกระบอกสูบ เป็นต้น ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของระบบอย่างน้อย 1 อย่างขึ้นไป จะถือว่ามีกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาวะหรือมีกระบวนการเกิดขึ้นทั้งสิ้น สำหรับเส้นทางแสดงสภาวะอย่างต่อเนื่องในระหว่างที่เกิดขึ้นกระบวนการ เรียกว่า เส้นทางของกระบวนการ (process path) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นทางของกระบวนการระหว่างสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 ระหว่างความดันกับปริมาตร

รูปที่ 2.2 ก เมื่อกระบวนการดำเนินไปในลักษณะที่ระบบมีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะสมดุลตลอดเวลา กระบวนการเช่นนี้เรียกว่า quasi - equilibrium process ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยไม่มีส่วนใดของระบบที่เปลี่ยนแปลงเร็วกว่าส่วนอื่นๆ ทำให้สามารถประมาณได้ว่าในแต่ละสภาวะที่กระบวนการดำเนินไปนั้นสมบัติต่างๆ เหมือนกันทั่วระบบ ดังนั้นเราสามารถวัดสมบัติที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะต่างๆ ในขณะที่ระบบดำเนินกระบวนการได้ และทำให้สามารถระบุเส้นทางของกระบวนการได้



(ก) การอัดตัวอย่างช้าๆ (quasi - equilibrium) (ข) การอัดตัวอย่างเร็วๆ (nonquasi - equilibrium)

รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดกระบวนการแบบ quasi - equilibrium และ nonquasi - equilibrium

รูปที่ 2.2 ข เมื่อแก๊สในระบบได้รับการกดอัดอย่างรวดเร็ว การกระตัวของโมเลกุลของแก๊สในระบบจะไม่สม่ำเสมอกล่าวคือความหนาแน่นของโมเลกุลในบริเวณที่ติดกับลูกสูบจะสูงกว่าในบริเวณที่อยู่ถัดออกไป ทำให้ความดันในบริเวณดังกล่าวสูงกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นสมบัติในแต่ละบริเวณของระบบจึงไม่เหมือนกัน กระบวนการในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า nonquasi - equilibrium process ในกระบวนการเช่นนี้เราไม่สามารถวัดสมบัติที่แน่นอนในสภาวะต่างๆ ในขณะที่ระบบดำเนินกระบวนการได้ ทำให้ไม่สามารถระบุเส้นทางของกระบวนการได้ แต่ทราบเพียงสภาวะเริ่มต้น (initial state) และสภาวะสุดท้าย (final state) เท่านั้น

สำหรับ quasi - equilibrium process เป็นเพียงกระบวนการในทางอุดมคติ (ideal process) ที่ถูกกำหนดขึ้นในทางทฤษฎีเท่านั้น อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณากระบวนการที่เกิดขึ้นจริงโดยทั่วไปพบว่ามีความหลากหลาย กระบวนการที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ quasi - equilibrium process ดังนั้น จึงสามารถกำหนดให้กระบวนการเหล่านั้นมีลักษณะดังกล่าวได้โดยมีข้อผิดพลาดอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ สาเหตุที่ให้ความสนใจ quasi - equilibrium process เนื่องจากการวิเคราะห์กระบวนการทำได้ง่ายเพราะทราบข้อมูลเส้นทางกระบวนการ นอกจากนี้กระบวนการในลักษณะนี้เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพที่สูงที่สุดด้วยเหตุนี้จึงจัดเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกระบวนการที่เกิดขึ้นได้จริง (actual process)

สำหรับกระบวนการที่มีสมบัติบางอย่างคงที่จะมีชื่อเรียกเฉพาะโดยจะมีคำนำหน้าคือ “iso” เช่น กระบวนการความดันคงที่ (constant pressure process) เรียกว่า isobaric process กระบวนการปริมาตรคงที่ (constant volume process) เรียกว่า isometric process และ กระบวนการอุณหภูมิคงที่ (constant temperature process) เรียกว่า isothermal process เป็นต้น

2.1.4 กฎทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics)

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

$$dU = dQ - dW \quad (2.1)$$

โดยที่ dU คือปริมาณการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ

dQ คือความร้อนที่เข้าสู่ระบบ

dW คืองานที่เกิดจากระบบ

กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ (Second law of thermodynamics) “ การเพิ่มขึ้นของเอนโทรปีหรือพลังงานเสียในระบบอิสระ ” สามารถอธิบายได้หลายแบบดังนี้

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

$$\Delta S \geq 0 \quad (2.2)$$

2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิง

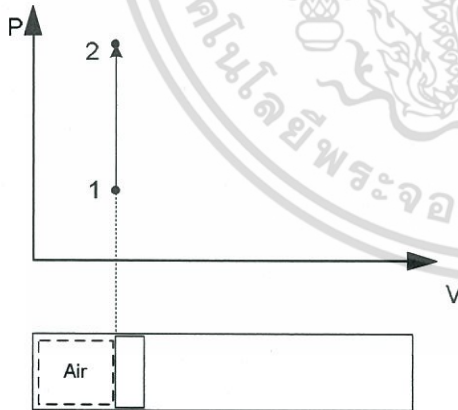
เครื่องจักรสเตอร์ลิงมีการทำงานเป็นลักษณะวนไปมาภายใต้อุณหภูมิต่ำและสูง เรียกว่าวัฏจักรสเตอร์ลิง ซึ่งมีความแตกต่างจากเครื่องจักรสันดาปภายใน ดังต่อไปนี้ ก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในกระบอกสูบของเครื่องจักรสเตอร์ลิง จะอยู่ในระบบปิดอยู่ภายในกระบอกสูบ ไม่สามารถรั่วไหลออกมาได้ จึงไม่ต้องมีวาล์วไอเสีย เหมือนกับเครื่องจักรก๊าซโซลีน หรือดีเซล และไม่มีการจุดระเบิดของหัวเทียนหรือน้ำมันเชื้อเพลิง เครื่องจึงเดินเงียบมาก พลังงานของเครื่องจักรสเตอร์ลิงมาจากความร้อนภายนอกกระบอกสูบ จึงไม่มีการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ

2.2.1 วัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling Cycle) ในทางอุณหพลศาสตร์

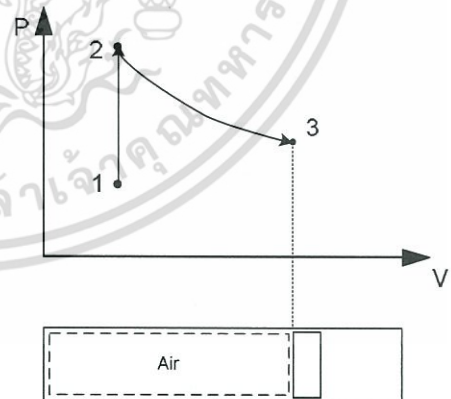
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในอุดมคติ คือ ไม่มีความเสียดหรือแรงเสียดทานจุดเคลื่อนที่ต่างและชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ต้องมีมวลเบา ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้จากแผนภาพ P-V ปริมาตรภายในเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการหาค่าภายในของรูปทรงเรขาคณิต โดยเริ่มต้นจะสามารถหาค่าความดันของระบบเมื่อมีการกำหนดค่าของปริมาตร (V) ค่าความดันของเครื่องยนต์สามารถคำนวณให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของสมมติฐานดังนี้

- 1) ไม่มีการสูญเสียความดันในการแลกเปลี่ยนความร้อนและไม่มี ความแตกต่างของความดันภายใน
- 2) ในกระบวนการบีบอัดและการขยายตัวจะต้องเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- 3) เงื่อนไขในการทำงานของก๊าซนั้นจะต้องเปลี่ยนเป็นเงื่อนไขของก๊าซในอุดมคติทั้งหมดต้องมีการผันกลับที่สมบูรณ์แบบ
- 4) การขยายตัวของปริมาตรตายจะต้องมีการคงค่าของอุณหภูมิในการขยายตัวของก๊าซ และอุณหภูมิในการบีบอัดตัวของก๊าซระหว่างรอบวัฏจักร
- 5) อุณหภูมิในการผันกลับของก๊าซจะต้องเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิในการขยายตัวของก๊าซและอุณหภูมิในการบีบอัดตัวของก๊าซ
- 6) ปริมาตรของการขยายและปริมาตรของการบีบอัดจะเปลี่ยนแปลงตามสมการเส้นโค้งแบบไซน์

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



รูปที่ 2.3 Isometric heating process



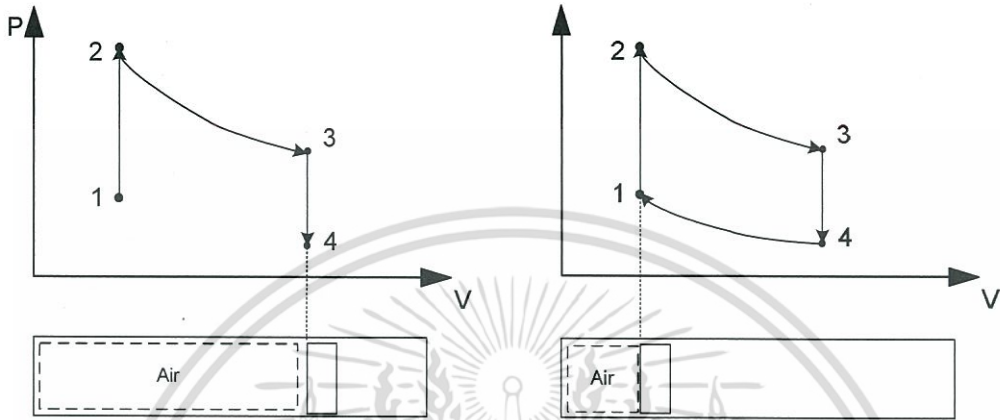
รูปที่ 2.4 Isothermal expansion process

กระบวนการ 1-2 คือ ขบวนการที่ปริมาตรคงที่แล้วยังได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดทำให้ความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น เป็นการให้พลังงานความร้อนเข้าสู่ระบบ แสดงดังรูปที่ 2.3

กระบวนการ 2-3 คือ ขบวนการขยายตัวที่อุณหภูมิกคงที่เป็นการขยายตัวของอากาศภายในกระบอกสูบที่ได้รับความร้อน ในกระบวนการนี้จะทำงานของระบบที่จากการขยายตัว แสดงดังรูปที่ 2.4 เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ 3-4 คือ ขบวนการที่ปริมาตรคงที่ ความดันลดลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนกลับสู่ธรรมชาติโดยผ่านฮีตซิงค์ ทำให้อากาศภายในเย็นตัวลงความดันจึงลดลง แสดงดังรูปที่ 2.5

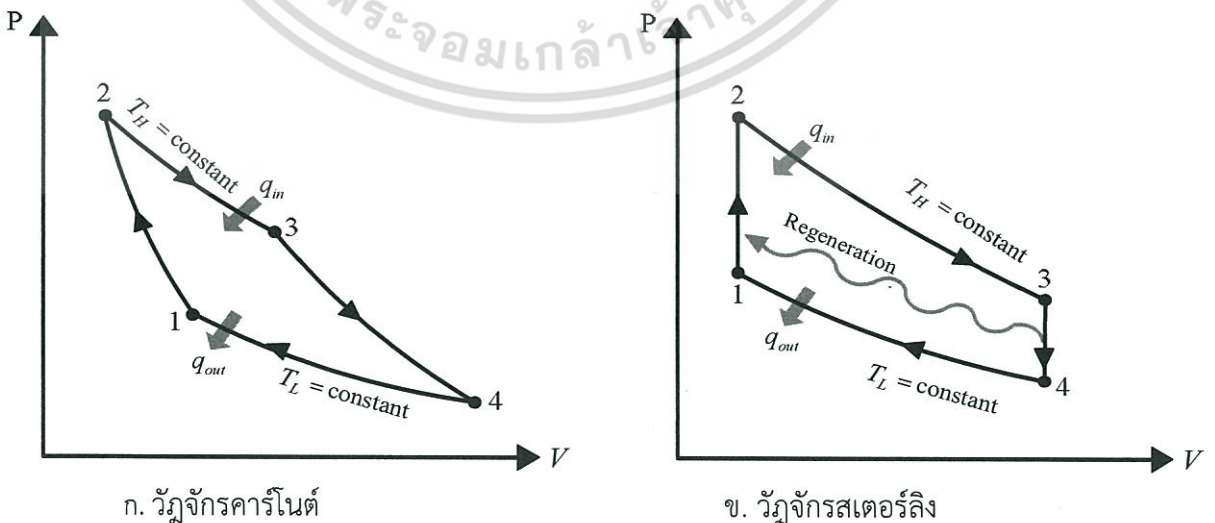
กระบวนการ 4-1 คือ ขบวนการอัดตัวที่อุณหภูมิคงที่ เกิดจากการคายความร้อนจากกระบวนการ 3-4 ทำให้เกิดการบีบอัดตัวของอากาศ ในขบวนการนี้จะได้อากาศจากการอัดตัวของอากาศ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 Isometric cooling process รูปที่ 2.6 Isothermal compression process

2.2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิงที่มีรีเจนเนอเรเตอร์

วัฏจักรสเตอร์ลิงแตกต่างจากวัฏจักรคาร์โนต์ คือ กระบวนการไอเซนโทรปิก 2 กระบวนการในวัฏจักรคาร์โนต์ถูกแทนที่ด้วยกระบวนการรีเจนเนอเรชันแบบความดันคงที่ 2 กระบวนการ วัฏจักรสเตอร์ลิงจะมีกระบวนการรีเจนเนอเรชัน (regeneration) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลทำงานไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ในการกักเก็บพลังงานความร้อน (thermal energy storage device) ที่เรียกว่ารีเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรและถ่ายโอนกลับมายังของไหลทำงานที่อีกส่วนหนึ่งของวัฏจักร แสดงดังรูปที่ 2.7



ก. วัฏจักรคาร์โนต์

ข. วัฏจักรสเตอร์ลิง

รูปที่ 2.7 แผนภาพ P-V ของวัฏจักรคาร์โนต์และวัฏจักรสเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขณะมีการรับและคายความร้อน กระบวนการอัดและขยายตัวจะเกิดที่กระบอกที่มีลูกสูบกำลังหรือกระบอกสูบเย็น (Power piston) ส่วนลูกสูบดันสูบดีสเพรสเซอร์หรือกระบอกสูบน้ำร้อน (Displacer) จะดันแก๊สให้เคลื่อนที่ไปกลับระหว่างส่วนร้อนผ่านรีเจเนอเรเตอร์ และส่วนเย็นที่มีปริมาตรคงที่ ในขณะที่มีการไหลของของไหลทำงานระหว่างส่วนร้อนและส่วนเย็น โดยวัฏจักรสเตอร์ลิงที่มีรีเจเนอเรเตอร์ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการผันกลับได้โดยรวมทั้งหมด 4 กระบวนการ คือ

1) กระบวนการให้ความร้อนแบบปริมาตรคงที่ 1-2 (Constant volume heating process 1-2) (ความร้อนถ่ายเทจาก Regenerator สู่อ่างทำงาน) เมื่อลูกสูบ Displacer กำลังหยุดนิ่งอยู่ที่ศูนย์ตายบน (TDC) รอคอยการเพิ่มขึ้นของความดันเนื่องจากได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดภายนอก ซึ่งจะมีผลให้อ่างทำงานเกิดการขยายตัว เมื่อ displacer ผลักดันอ่างทำงานให้ไหลผ่านรีเจเนอเรเตอร์ ซึ่งเก็บสะสมความร้อนไว้ภายในไปสู่อ่างร้อน ความร้อนจำนวนหนึ่งจะถ่ายเทให้กับอ่างทำงาน ความร้อนที่รีเจเนอเรเตอร์จะถ่ายเทให้กับอ่างทำงานจะทำให้อุณหภูมิและความดันของอ่างทำงานสูงขึ้นจากสถานะ 1 ไปยังสถานะ 2 โดยปริมาตรคงที่ สรุปได้ว่าในกระบวนการนี้ความร้อนที่เก็บสะสมไว้ในรีเจเนอเรเตอร์ถูกถ่ายเทให้กับอ่างทำงาน

2) กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 2-3 (Isothermal expansion process 2-3) (ความร้อนถ่ายเทจากแหล่งความร้อนภายนอกสู่อ่างทำงานที่อุณหภูมิสูงคงที่) หลังจากที่ความดันเพิ่มขึ้นจนสูงสุด อ่างทำงานจะอยู่ในอ่างร้อนและเกิดการขยายตัวไปสู่ความดัน P3 ในขณะที่เกิดกระบวนการให้ความร้อนโดยอุณหภูมิคงที่ 2-3 ในอ่างร้อนลูกสูบกำลังจะเริ่มถูกผลักดันจากศูนย์ตายบน (TDC) ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) โดยความดันที่เพิ่มขึ้นจะถ่ายเทกำลังไปยังล้อเกี่ยกระดุนกำลัง (Flywheel) ดังนั้นจึงเป็นการสร้างพลังงานกลให้เกิดขึ้น และพลังงานกลนี้จะถูกใช้ประโยชน์โดยตลอดในกระบวนการที่เหลืออยู่ของวัฏจักรงานที่กระทำโดยอ่างทำงานนี้คือพื้นที่ภายใต้กระบวนการ 2-3

3) กระบวนการระบายความร้อนแบบปริมาตรคงที่ 3-4 (Constant volume cooling process 4-1) (ความร้อนถ่ายเทจากอ่างทำงานเก็บสะสมใน รีเจเนอเรเตอร์) หลังจากลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) และถ่ายเทกำลังไปยังล้อเกี่ยกระดุนกำลัง (Flywheel) ลูกสูบกำลังหยุดนิ่ง และพร้อมที่จะเคลื่อนที่กลับไปศูนย์ตายบนภายใต้โมเมนตัมของล้อเกี่ยกระดุนกำลัง (Flywheel) และการดูดของสูญญากาศที่เกิดขึ้นเป็นบางส่วนโดยความดันคงที่ลดลงของอ่างทำงาน ลูกสูบ Displacer จะเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่าง (BDC) สู่อ่างตายบน (TDC) และผลักดันอ่างทำงานไปยังช่องเย็น ซึ่งในช่องเย็นนี้ความดันจะลดลงและเกิดสูญญากาศเป็นบางส่วนขึ้น อ่างทำงานจะถูกผลักดันผ่านรีเจเนอเรเตอร์เป็นสาเหตุให้อุณหภูมิและความดันของอ่างทำงานลดลงจากสถานะ 3 เป็นสถานะ 4 โดยปริมาตรคงที่ ความร้อนถูกระบายออกจากอ่างทำงานไปเก็บสะสมไว้ในรีเจเนอเรเตอร์

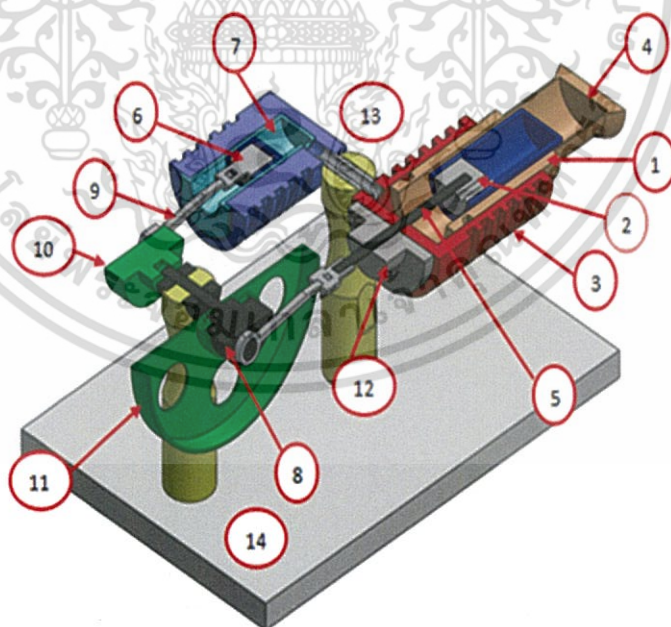
4) กระบวนการอัดแบบอุณหภูมิคงที่ 4-1 (Isothermal compression process 4-1) (ความร้อนถ่ายเทจากอ่างทำงานอุณหภูมิต่ำสู่แหล่งระบายความร้อนภายนอก) หลังจากที่ลูกสูบ displacer ได้ผลักดันอ่างทำงานสู่อ่างเย็นของกระบอกสูบ ซึ่งอ่างทำงานจะเย็นตัวลง จากนั้นลูกสูบ displacer จะหยุดนิ่งเป็นสถานะ 4 และความดันในสถานะนี้คือ P4 จากนั้นลูกสูบกำลังจะเริ่มถูกผลักดันจากศูนย์ตายล่าง (BDC) สู่อ่างตายบน (TDC) ด้วยโมเมนตัมของล้อเกี่ยกระดุนกำลัง (Flywheel) โดยมีความเป็นสูญญากาศบางส่วนซึ่งเกิดจากการเย็นตัวของอ่างทำงาน อ่างทำงานในขณะนี้จะถูกระบายความร้อนออกและอยู่ภายใต้ความกดดันของลูกสูบกำลัง ซึ่งเมื่อถึงศูนย์ตายบนก็จะเป็นการอัดอ่างทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสถานะ 4 ถึงสถานะ 1 โดยอุณหภูมิมืดที่ งานที่กระทำกับสารทำงานแสดงโดยพื้นที่ภายใต้ กระบวนการ 4-1

2.3 ส่วนประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาประกอบด้วยลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง ทั้งสอง กระบอกสูบแยกจากกันซึ่งจะมีการออกแบบง่ายๆ โดยทั้งสองกระบอกสูบนี้จะเชื่อมต่อถึงกัน การ แยกกันของกระบอกสูบนี้ทำให้มีการแยกกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ เกี่ยวข้องกับกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และงานที่เกิดขึ้นจากพื้นการบีบอัดและขยายตัวของ ลูกสูบ กำลัง โดยทั่วไปกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์จะมีขนาดใหญ่กว่ากระบอกสูบของลูกสูบกำลังหลายเท่า เป็นผลให้โอกาสการเกิดปริมาตรตายนั้นจะมีมากกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาหรือแบบเบต้า แม้ว่ากระบอกสูบของลูกสูบทั้งสองนี้จะแยกออกจากกันแต่จะมีเพียงกระบอกสูบหนึ่งเท่านั้นที่ต้อง (มี ลูกสูบกำลังอยู่ใน) ป้อนกันการรั่ว นอกจากนี้การแยกกันของกระบอกสูบทั้งสองยังทำให้ลูกสูบกำลัง ปราศจากปัญหาในเรื่องการสะสมทางความร้อนส่งผลให้มีความแปรปรวนที่เป็นผลจากขนาดกระบอก สูบน้อยลงเนื่องจากการสร้างหรือการขยายตัว การป้อนกันการรั่วนี้จะง่ายกว่าเครื่องชนิดอื่นๆ ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกแยกออกจากกระบอกสูบกำลังแต่ก็จะรวมอยู่กับกระบอกสูบดิสเพลส เซอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าซึ่งการออกแบบและการจัดวางตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะกลายเป็นเรื่องที่ย่าง กว่า จึงทำให้สามารถใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่กว่าและดีกว่าและสามารถใช้ในพื้นที่ที่ ต้องการได้



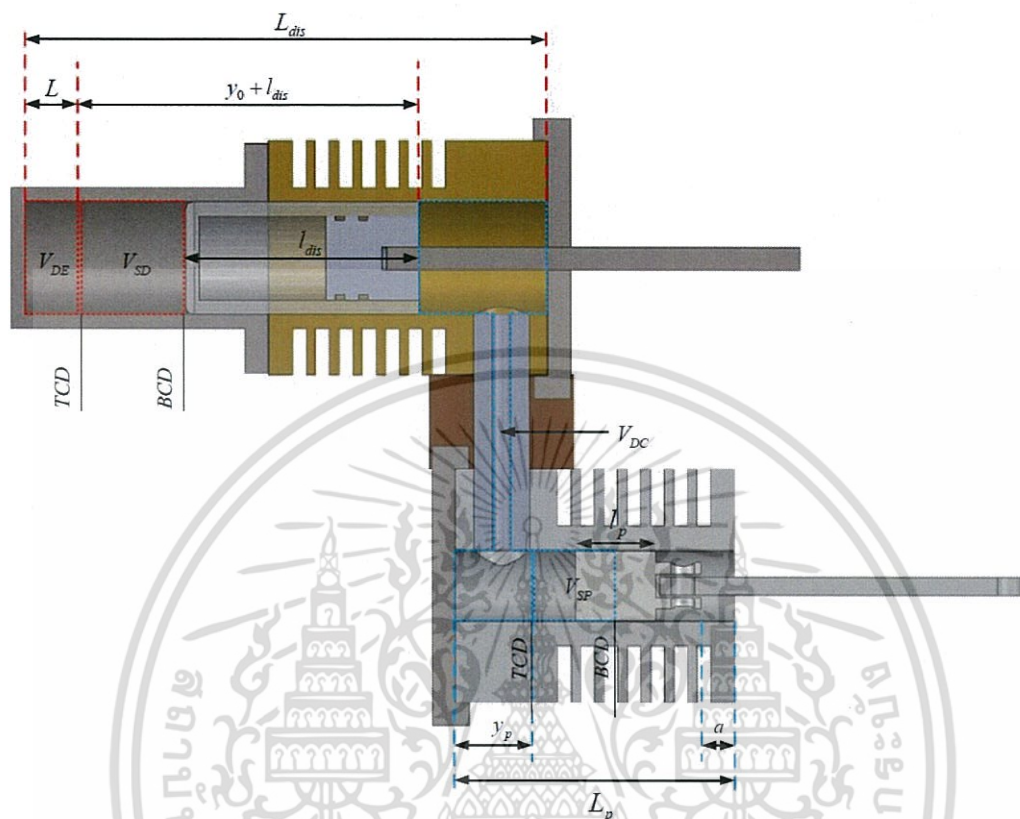
รูปที่ 2.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากรูปที่ 2.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา สามารถแบ่งส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์ ได้ดังนี้
- (1) กระจกอบลูกสูบดิสเพลสเซอร์ คือ กระจกอบที่มีลูกสูบดิสเพลสเซอร์อยู่ภายในซึ่งจะเชื่อมต่อกับฮีตเตอร์
 - (2) ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ คือ ลูกสูบที่ทำหน้าที่สำหรับไล่อากาศจากฝั่งร้อนไปยังฝั่งเย็น
 - (3) ฮีตซิงค์ คือ ส่วนที่ช่วยในการระบายความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
 - (4) ฮีตเตอร์ คือ ส่วนที่รับความร้อนโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อใช้ในกระบวนการบีบอัดและขยายตัวของของไหลภายในกระจกอบลูกสูบ
 - (5) แกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ คือ ส่วนสำคัญในการรับแรงและส่งแรงให้ข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์
 - (6) ลูกสูบกำลัง คือ ลูกสูบสำหรับขับเคลื่อนเพื่อส่งต่อไปยังล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง
 - (7) กระจกอบลูกสูบกำลัง คือ กระจกอบที่มีลูกสูบกำลังอยู่ภายในซึ่งจะต้องเชื่อมต่อกับกระจกอบดิสเพลสเซอร์
 - (8) ข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์ คือ ส่วนที่เชื่อมต่อกับแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์และล้อเกียร์เพื่อ ถ่ายทอดกำลัง
 - (9) แกนลูกสูบกำลัง คือ ส่วนสำคัญในการรับแรงและส่งแรงให้ข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง
 - (10) ข้อเหวี่ยงสำหรับลูกสูบกำลัง คือ ส่วนที่เชื่อมต่อกับแกนลูกสูบกำลังและล้อเกียร์เพื่อถ่ายทอดกำลัง
 - (11) ล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง คือ ส่วนที่ใช้ในการสะสมพลังงานจลน์ซึ่งถือว่าเป็นเอาท์พุทของระบบ
 - (12) บุช คือ ตัวที่ใช้ซิลเพื่อป้องกันการรั่วของอากาศภายในกระจกอบลูกสูบเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความดันภายในกระจกอบลูกสูบ
 - (13) ฐานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา คือ ส่วนที่ใช้ยึดกระจกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยภายในจะมีท่อที่ใช้เชื่อมต่อเพื่อและเปลี่ยนอากาศระหว่างกระจกอบดิสเพลสเซอร์และกระจกอบลูกสูบกำลัง
 - (14) ฐานรับล้อเกียร์ คือ ส่วนที่ใช้ยึดล้อเกียร์กระตุ้นกำลังกับตัวข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์และ ข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง

2.4 การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์

ที่รัศมีข้อเหวี่ยง $r_p = 10 \text{ mm}$



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างและตำแหน่งตำแหน่งของระยะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

อัตราส่วนกำลังอัด (Compression ratio) หาได้ดังสมการ

$$\xi = 1 + (V_{SD} / V_{DE}) \quad (2.3)$$

ปริมาตรรวม (V) ดังรูปที่ 2.10-2.11 จะสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (2.4)$$

ปริมาตรขยาย (Expansion volume V_E)

$$V_E = \frac{V_{SD}}{2}(1 - \cos \theta) + V_{DE} \quad (2.5)$$

V_{SD} คือ ปริมาตรการกวาดของลูกสูบดีสเพลสเซอร์ ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{DE} = \frac{\pi D_{dis}^2 L}{4} \quad (2.6)$$

V_{DE} คือ ปริมาตรตายของปริมาตรขยาย ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร

D_{dis} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ ในหน่วยมิลลิเมตร

L คือ ความยาวของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ของปริมาตรตาย ในหน่วยมิลลิเมตร

ปริมาตรอัดตัว (Compression volume V_C)

$$V_C = \frac{V_{SD}}{2}[1 + \cos\theta] + \frac{V_{SP}}{2}[1 - \cos(\theta - \varphi)] + V_{DC} \quad (2.7)$$

V_{SP} คือ ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร

$\varphi = \pi / 2$ คือ มุมเฟสการทำงานระหว่างลูกสูบกำลังกับลูกสูบดิสเพลสเซอร์

$$V_{DC} = \frac{1}{4} (\pi D_{dis}^2 [L_{dis} - (L + y_0 + l_{dis})] + \pi D_p^2 [L_p - (l_p + y_p + a)]) \quad (2.8)$$

V_{DC} คือ ปริมาตรตายของปริมาตรการอัดตัว ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร

L_{dis} คือ ความยาวของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ ในหน่วยมิลลิเมตร

y_0 คือ ระยะชักของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ในหน่วยมิลลิเมตร

l_{dis} คือ ความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ในหน่วยมิลลิเมตร

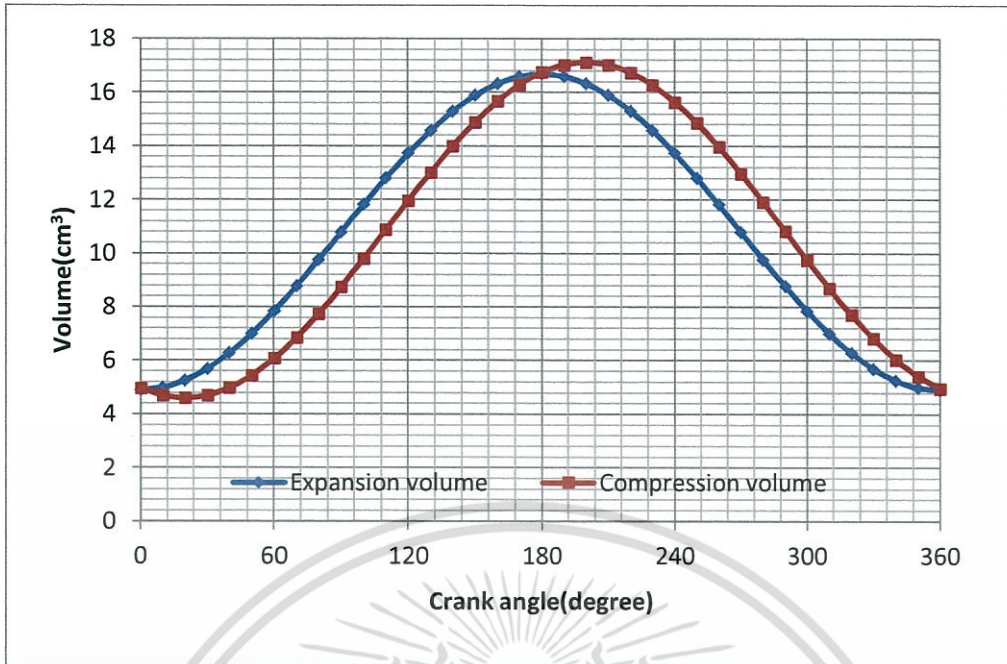
D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบกำลัง ในหน่วยมิลลิเมตร

L_p คือ ความยาวของกระบอกสูบกำลัง ในหน่วยมิลลิเมตร

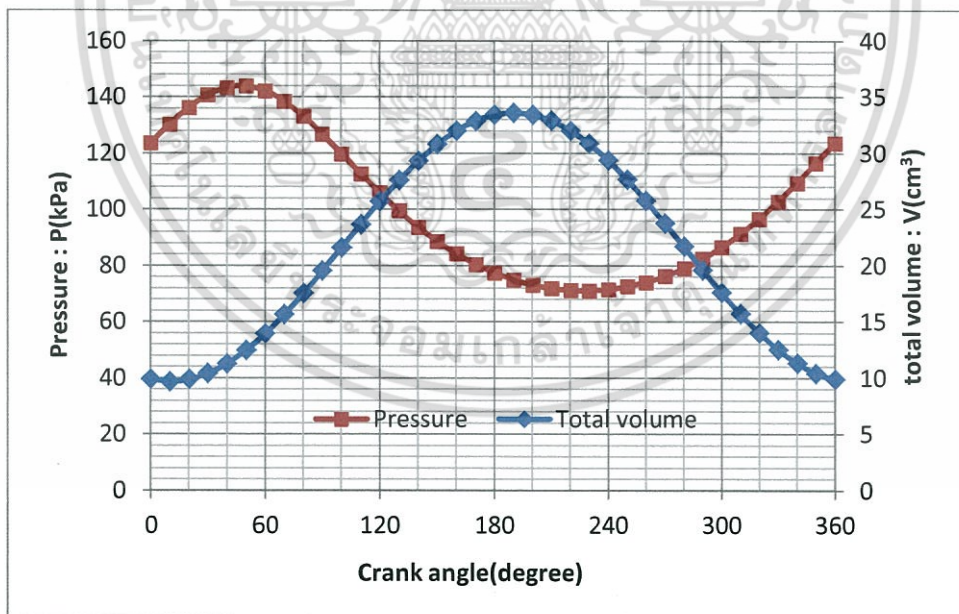
l_p คือ ความยาวของลูกสูบกำลัง ในหน่วยมิลลิเมตร

y_p คือ ความยาวของปริมาตรตายของกระบอกสูบกำลัง ในหน่วยมิลลิเมตร

a คือ ความยาวด้านท้ายของกระบอกสูบกำลัง ในหน่วยมิลลิเมตร

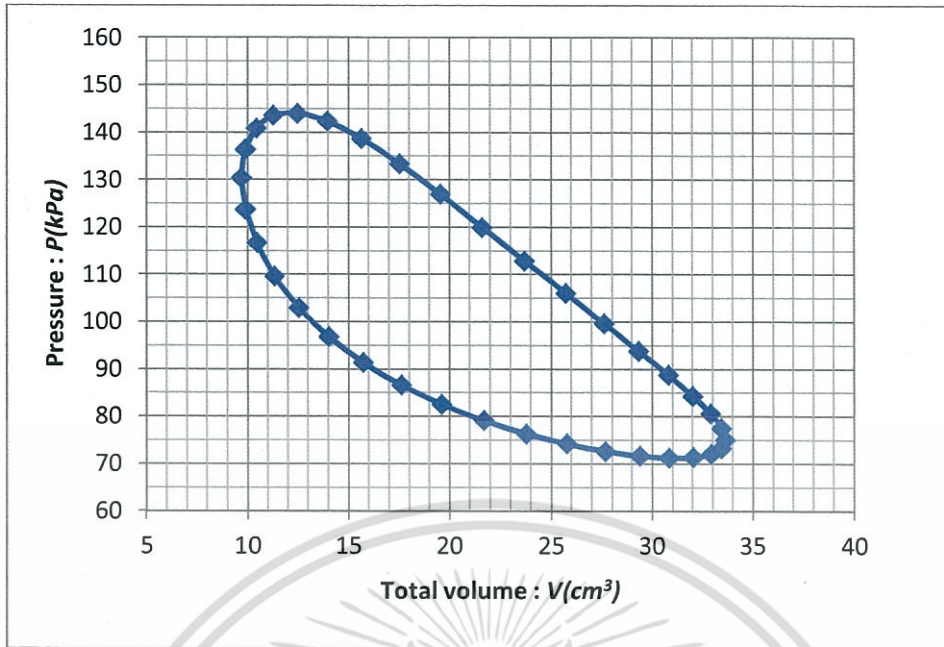


รูปที่ 2.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรพื้นที่การขยายและการบีบอัดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงที่เปลี่ยนแปลงกับปริมาตรรวม (V) และความดัน (P) ภายในระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรวม (V) กับความดัน (P) ภายในระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ความดันทั้งหมด (Total pressure P) ใน 1 รอบวัฏจักรของเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 2.12 ดังนี้

$$P = \frac{p_{mean} \sqrt{1-\lambda^2}}{1-\lambda \cos(\theta-\delta)} \quad (2.9)$$

เมื่อ $p_{mean} = 1.013$ bars.

λ อัตราส่วนระหว่าง A และ B ซึ่งเขียนได้

$$A = (\gamma^2 + 2(\gamma-1)\chi_s \cos \varphi + \chi_s^2 - 2\gamma + 1)^{1/2} \quad (2.10)$$

$$B = (\gamma + 2\gamma\nu + \frac{4\gamma V_R}{1+\gamma} + \chi_s + 2\zeta + 1) \quad (2.11)$$

$\gamma = T_C / T_H, T_H$ (K) คือ อุณหภูมิฝั่งร้อน และ T_C (K) คือ อุณหภูมิฝั่งเย็น

$\chi_s = V_{SP} / V_{SD}$ คือ อัตราส่วนของปริมาตรกวาด

$\nu = V_{DE} / V_{SD}$ และ $\zeta = V_{DC} / V_{SD}$ คือ อัตราส่วนของปริมาตรขยายและอัดตัวตามลำดับ

V_R คือ ปริมาตรของรีเจนเนอเรเตอร์

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\chi_s \sin \varphi}{\gamma + \cos \varphi + 1} \right) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังเอาต์พุต (Output mechanical power P_s)

$$P_s = W_i N = \frac{2\pi N \tau}{60} \quad (2.13)$$

เมื่อ $f = \frac{N}{60}$

ซึ่ง $W_i = W_E + W_C$ คือ งานสุทธิที่เกิดจากการทำงาน 1 รอบวัฏจักร (mj)

N คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)

τ คือ แรงบิดของเครื่องยนต์ (N-cm)

งานที่เกิดจากการขยายตัวของสารทำงาน หาได้ตามสมการที่

$$W_E = \oint P dV_E = \frac{P_{mean} V_{SD} \pi \lambda \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - \lambda^2}} \quad (2.14)$$

งานที่เกิดจากการอัดตัวของสารทำงาน

$$W_C = \oint P dV_C = - \frac{P_{mean} V_{SD} \pi \lambda \gamma \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - \lambda^2}} \quad (2.15)$$

Beale number B_o คำนวณได้จาก

$$B_o = \frac{P_s}{P_{mean} f V_{SD}} \quad (2.16)$$

ประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency, η) ใน 1 รอบวัฏจักรหาได้ดังสมการนี้

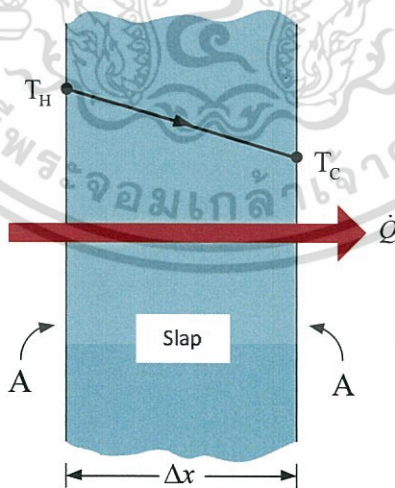
$$\eta = 1 - \gamma \quad (2.17)$$

2.5 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งในจักรวาลมีค่าแตกต่างกัน โดยความร้อนจะถ่ายเทจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปที่ที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ ดังตัวอย่างในชีวิตประจำวันที่เราพบเห็นเช่น เมื่อเราเอามือเราไปจับน้ำแข็งซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่ามือเรารู้สึกเย็น เราจะรู้สึกเย็น ที่เป็นเช่นนี้เพราะร่างกายสูญเสียความร้อนไปให้น้ำแข็งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เรารู้สึกเย็น สำหรับงานด้านโลหะวิทยาที่มีการประยุกต์ใช้ความรู้ด้านการถ่ายเทความร้อนอย่างกว้างขวาง เพราะกระบวนการทางโลหวิทยาล้วนแล้วแต่อาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลหะที่เข้าสู่กระบวนการ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของโลหะเปลี่ยนไปถึงจุดวิกฤตค่าหนึ่งจะทำให้เฟสในเนื้อโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นได้ทั้งการเปลี่ยนแปลงจากสภาพเฟสที่เป็นของแข็งเฟสหนึ่งไปเป็นของแข็งอีกเฟสหนึ่ง เช่นกระบวนการอบชุบเหล็กกล้า การอบชุบโลหะผสมอะลูมิเนียม หรือการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างของเหลวกับของแข็ง โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในธรรมชาติที่มนุษย์เราค้นพบแล้วมีอยู่กัน 3 วิธี คือ การนำความร้อน การแผ่รังสี และการพาความร้อน

2.5.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน คือ การที่ความร้อนจากจุดหนึ่งส่งผ่านเนื้อของสสารไปยังอีกจุดหนึ่งโดยเนื้อของสสารที่นิ่งอยู่กับที่ ตัวอย่างของการนำความร้อน เช่น บริเวณผนังของเครื่องกำเนิดไอน้ำในโรงไฟฟ้า โดยผนังด้านในสัมผัสกับไอน้ำหรือน้ำจะมีอุณหภูมิที่สูง ในขณะที่ผนังด้านนอกสัมผัสกับอากาศที่คอยหล่อเย็นก็จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งระดับของอุณหภูมิของผนังมีความสำคัญต่อเครื่องกำเนิดไอน้ำ ในการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัวทั่วแผ่นหินที่มีความหนา $Q_r = \alpha \varepsilon AT^4$ โดยผิวทั้งสองด้านของแผ่นหินมีอุณหภูมิที่ต่างกันคือ ด้านร้อน (T_H) และด้านเย็น (T_C) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.13 การนำความร้อนผ่านแผ่นหินความหนา Δx และพื้นที่

จากรูปที่ 2.1 พบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิด้านร้อน, อุณหภูมิด้านเย็นและรูปทรงของแผ่นหินและคุณสมบัติต่างๆของแผ่นหิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{Q} = f(T_H, T_C, \text{geometry}, \text{properties}) \quad (2.18)$$

ในอีกทางก็สามารถบอกได้ว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน \dot{Q} นั้นขึ้นอยู่กับความต่างของอุณหภูมิผิวด้านร้อนและด้านเย็น ($T_H - T_C$) โดยค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อไม่มีความต่างของอุณหภูมิ

$$\dot{Q} = f((T_H - T_C), T_H, \text{geometry}, \text{properties}) \quad (2.19)$$

โดยฟูเรียร์ได้พิสูจน์ว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นแปรผันโดยตรงกับความต่างของอุณหภูมิของผิวแผ่นหินและมีค่าแปรผกผันกับความหนาของแผ่นหิน

$$\text{Heat Transfer Rate} \propto \frac{(\text{Area})(\text{Thermal difference})}{\text{Thickness}} \quad (2.20)$$

หรือ

$$\dot{Q} \propto \frac{A(\Delta T)}{\Delta x} \quad (2.21)$$

ซึ่งในความสัมพันธ์ (4) นั้น ตัวแปร (k) ที่ถูกคูณเข้าไปเพื่อสร้างสมการเรียกว่าสภาพการนำความร้อน (W/mK) จะได้สมการที่ 5 คือ

$$\dot{Q} = kA \frac{(T_H - T_C)}{\Delta x} = -kA \frac{(T_C - T_H)}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.22)$$

โดยค่าสภาพการนำความร้อนนั้นจะบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ ตัวแปร A คือพื้นที่หน้าตัด (m^2), Δx คือความหนาของแผ่นหิน (m) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการจัดกลุ่มของวัสดุ โดยตารางที่ 1 จะแสดงค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่เราคุ้นเคยกัน

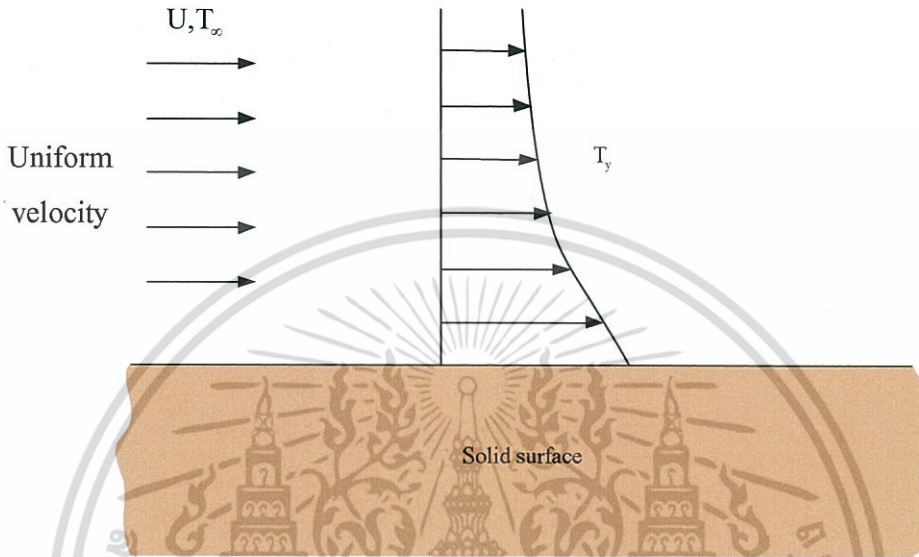
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าสภาพการนำความร้อนที่อุณหภูมิห้องของวัสดุต่างๆ

โลหะ	K (W/mK)	อโลหะ	K (W/mK)
เงิน	420	น้ำ	0.6
ทองแดง	390	อากาศ	0.026
อลูมิเนียม	200	น้ำมันเครื่อง	0.15
เหล็ก	70	ไฮโดรเจน	0.18
เหล็กกล้า	50	ก้อนอิฐ	0.4-0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อน คือ การที่ความร้อนจากจุดหนึ่งในสสารเคลื่อนที่ไปยังอีกจุดหนึ่งในสสารโดยติดไปกับสสารที่เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งบอกถึงการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างพื้นผิวกับของไหลที่กำลังเคลื่อนที่เหนือพื้นผิวนั้นๆ ดังรูปที่ 2.3.2



รูปที่ 2.14 การพาความร้อนจากพื้นผิวร้อน

ในการพาความร้อนนั้นจะต้องพิจารณาถึงลักษณะบางอย่างของการเคลื่อนที่ของไหลบริเวณใกล้กับพื้นผิว ซึ่งในขณะที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวจะเกิดแนวพื้นที่บางๆ ของของไหลที่เคลื่อนที่เข้าเรียกว่า “boundary layer” ใกล้กับพื้นผิว โดย boundary layer (δ) ไม่ใช่คุณสมบัติของของไหล และขึ้นอยู่กับความเร็วของไหล, โครงสร้างของพื้นผิว, เกรเดียนต์ของความดัน โดยสามารถหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากพื้นผิวถึงของไหลได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน ดังสมการ

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.23)$$

โดยค่า h (W/m^2K) คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน, T_s คืออุณหภูมิของพื้นผิว และ T_∞ คืออุณหภูมิของไหล ซึ่งเมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 6 จะสามารถหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยได้ ซึ่งจำได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (\bar{h}) สำหรับพื้นผิวทั้งหมด

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_{A_s} h dA_s \quad (2.24)$$

2.5.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อน คือการที่พลังงานถูกปล่อยออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แน่นอน โดยวัตถุนั้นอาจ เป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ก็ได้ พลังงานของสนามการแผ่รังสีมีการถ่ายเทโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือเรียกอีกนัยหนึ่งว่าโฟตอน (Photons) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาความร้อนจะต้อง อาศัยตัวกลางในการถ่ายเท การถ่ายเทโดยการแผ่รังสีไม่ต้องการอาศัยตัวกลางใด ๆ และจะเกิดการถ่ายเทได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ สำหรับวิศวกรวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่โดยการแผ่รังสี อาจไม่มีความสำคัญเท่ากับที่จะรู้วิธีการ คำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการแผ่รังสี ในปี 1884 สเตฟานและโบลซ์แมน (Stefan and Boltzmann) ได้เสนอสมการในการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนสูงสุดโดยการแผ่รังสีจากวัตถุที่มี พื้นที่ A และอุณหภูมิ T ดังนี้

$$Q_r = \alpha AT^4 \quad (2.25)$$

โดยที่ Q_r คืออัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (W), α คือค่าคงที่ของสเตฟานและโบลซ์แมน (Stefan and Boltzmann constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ในระบบ SI, A คือพื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน (m^2) และ T คืออุณหภูมิของผิวที่แผ่รังสีความร้อน (K)

สมการ 8 นี้ สามารถที่จะนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อประโยชน์ในการออกแบบเครื่องมือต่าง ๆ ได้วัตถุที่ให้ค่าการแผ่รังสีความร้อนสูงสุดตามสมการที่ 8 เรียกว่า วัตถุในอุดมคติหรือวัตถุดำ (black body) วัตถุที่มีอยู่ทั่ว ๆ ไปจะแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุดำ การแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุโดยทั่ว ๆ ไปที่มีอุณหภูมิ T และพื้นที่ A จะ เขียนได้ดังนี้

$$Q_r = \alpha \epsilon AT^4 \quad (2.26)$$

โดยที่ ϵ คือคุณสมบัติทางการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุซึ่งเรียกว่า ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้ สูงสุด ϵ จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

การที่จะหาอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างวัสดุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันนั้นยุ่งยากมาก การพิจารณากรณีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุเล็กที่มีพื้นที่ผิว A และค่าการแผ่รังสีความร้อน ϵ กับวัตถุใหญ่ซึ่งครอบคลุมวัตถุเล็กอยู่ โดยที่วัตถุเล็กมีอุณหภูมิ T_H และวัตถุใหญ่มีอุณหภูมิ T_C เราสามารถเขียนอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิของวัตถุทั้งสองได้ดังนี้

$$Q_r = \alpha \epsilon A(T_H^4 - T_C^4) \quad (2.27)$$

หรือ

$$Q_r = h_r A(T_H - T_C) \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$h_r = \alpha \varepsilon (T_H + T_C)(T_H^2 - T_C^2) \quad (2.29)$$

เมื่อ h_r คือสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer coefficient)

2.6 ทฤษฎีทางวัสดุศาสตร์

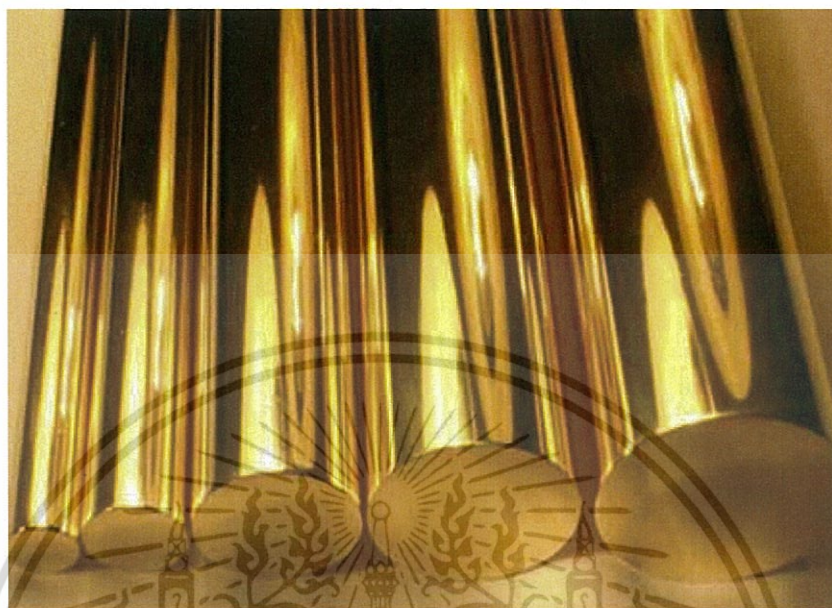
วัสดุศาสตร์ (Materials science) เป็นศาสตร์ที่ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุและกระบวนการที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาศัยความรู้จากหลายสาขาวิชา เช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา และธรณีวิทยา โดยมุ่งความสนใจไปที่คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุในสถานะที่เป็นของแข็งอันได้แก่ โครงสร้าง ระดับอะตอมหรือโมเลกุลของวัสดุ คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ การนำความร้อน คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า คุณสมบัติที่ยอมให้แสงผ่าน หรือการผสมผสานกันของบางคุณสมบัติตามที่กล่าวมานี้ คุณสมบัติของวัสดุที่สังเกตง่ายและชัดเจนจะแสดงออกมาในรูปของ คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ ส่วนความแตกต่างในระดับโครงสร้างโมเลกุลและอะตอมจะต้องใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ซับซ้อนในการตรวจสอบ สำหรับการประเมินสมรรถนะของวัสดุจะเป็นพื้นฐานของงานวิศวกรรมที่จะนำวัสดุนั้น ๆ ไปใช้งาน ส่วนวิชาว่าด้วยวัสดุศาสตร์จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการความรู้ทางเทคโนโลยีของวัสดุสี่ส่วนซึ่งแต่ละส่วนจะเกี่ยวข้องเชื่อมโยงซึ่งกันและกันเป็นรูปสี่มุมสี่ด้าน (Tetrahedron) การนำวิชาการทางด้านวัสดุศาสตร์ไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวางทำให้เกิดนิยามของวิชาการสาขานี้ใหม่เป็น "วัสดุศาสตร์และวิศวกรรม" วัสดุที่คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นใหม่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่หรือไม่ก็เกิดอุตสาหกรรมใหม่ อุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องมีนักวิทยาศาสตร์หรือวิศวกรสาขาวัสดุศาสตร์คอยดูแลแก้ไขปัญหาและวิจัยวัสดุใหม่ ๆ อย่างต่อเนื่อง ในอุตสาหกรรมนี้วัสดุศาสตร์จะมีบทบาทในส่วนของ การออกแบบวัสดุ (materials design) การประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตวัสดุนั้น ๆ ดูแลกระบวนการทางเทคนิคซึ่งประกอบด้วย การหล่อ, การม้วน, การเชื่อม, การใส่ประจุ, การเลี้ยงผลึก, การรอกฟิล์ม (thin-film deposition) , การเป่าแก้ว เป็นต้น และเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน, การเอกซเรย์ เป็นต้น

เนื่องจากประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นมีผลจากอุณหภูมิ กระบวนการทางความร้อน การถ่ายเทความร้อน ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้ในส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ต้องมีคุณสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสม เช่น สามารถทนความร้อนได้สูงและถ่ายเทความร้อนได้ดี อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์อีกด้วย เช่น น้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในลูกสูบต้องเบา เป็นต้น

2.6.1 ทองเหลือง (Brass)

ทองเหลืองเป็นโลหะผสมที่มีทองแดงและสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก ปริมาณของสังกะสีนั้นแปรเปลี่ยนไป ระหว่าง 5 - 45 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้ทองเหลืองที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป ทองเหลืองแตกต่างจากสำริดตรงที่ สำริดมีส่วนประกอบของทองแดงและดีบุกเป็นหลัก แต่ทองเหลืองบางชนิดก็ถูกเรียกว่า "สำริด" ก็มี ทองเหลืองนั้นมีสีเหลือง จึงมีลักษณะบางส่วนคล้ายทองคำ มีความต้านทานต่อการเกิดสนิมได้ดีพอสมควร จึงนิยมนำมาทำเป็นเครื่องประดับ ตกแต่งภายในบ้านเรือน ในอุตสาหกรรมผลิตทองเหลืองทั่วไป จะแยกมาตรฐานออกไปสองกลุ่มคือ ประเภทรีดเป็น แท่ง หรือเป็นแผ่น (Wrought copper alloys) กับอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นประเภทหล่อ (Cast copper) การผลิตทองเหลืองนั้น อาศัยการหลอมละลายทองแดงกับแร่คาลาไมน ซึ่งเป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สินแร่สังกะสีชนิดหนึ่ง ในกระบวนการนี้ สังกะสีจะถูกคูดออกมาจากคาลาไมน์ และผสมเข้ากับทองแดง



รูปที่ 2.15 ทองเหลือง (Brass)

ประเภทของทองเหลือง

1. Admiralty brass ประกอบด้วย สังกะสี 30% ดีบุก 1% ซึ่งยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา dezincification
2. Alpha brasses (Prince's metal) ประกอบด้วยสังกะสีน้อยกว่า 35% ทองเหลืองชนิดนี้สามารถตีเป็นแผ่นได้ เหมาะกับการใช้งานอุณหภูมิต่ำ
3. Alpha-beta brass (Muntz metal หรือ called duplex brass) มีสังกะสี 35-45% เหมาะกับการใช้งานอุณหภูมิสูง ประกอบด้วย α กับ β phase
4. Aluminium brass (Nordic gold) ประกอบด้วยอลูมิเนียม ทนทานการกัดกร่อน ใช้ทำเหรียญยูโร
5. Arsenical brass มีส่วนผสมของสารหนู และมักจะใส่อลูมิเนียมด้วย ใช้ทำหม้อของห้องเผาไหม้
6. Beta brasses มีสังกะสี 45-50% ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง มีความแข็งแรงทนทาน เหมาะกับการหล่อ
7. Cartridge brass มีสังกะสี 30% มีคุณสมบัติในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ
8. Common brass (rivet brass) มีสังกะสี 37% ราคาถูกและใช้ในที่เย็นได้
9. DZR brass มีส่วนผสมของสารหนูเล็กน้อย มีคุณสมบัติต่อต้านปฏิกิริยา Dezincification
10. Gilding metal เป็นทองเหลืองที่อ่อนที่สุด มีทองแดง 95% และสังกะสี 5% มักใช้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. High brass มีทองแดง 65% และสังกะสี 35% มีความยืดหยุ่นสูง ใช้ทำสปริง สกรู หมุด
12. Leaded brass คล้ายกับชนิด alpha-beta brass แต่ใส่ตะกั่วเพิ่ม มีความสามารถในการขึ้นรูปไหลสูง
13. Low brass เป็นโลหะผสมของทองแดงกับสังกะสี มีสังกะสี 20% มีสีทองอ่อนๆ สามารถทำให้เป็นเส้นบางๆได้ดีเยี่ยม ใช้ทำท่อส่งน้ำ/แก๊สที่ยืดหยุ่นสูง
14. Naval brass คล้ายกับ admiralty brass มีสังกะสี 40% และดีบุก 1%
15. Red brass สูตรคือ CuZnSn มักเรียกว่า gunmetal
16. Rich low brass มีทองแดง 85% สังกะสี 15% ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องประดับ
17. White brass มีสังกะสีมากกว่า 50% เปราะบาง
18. Yellow brass มีสังกะสี 33%

ข้อดีของทองเหลืองที่มีต่ออุตสาหกรรม

ข้อดีของทองเหลืองที่มีต่ออุตสาหกรรม ทั้งผลิตภัณฑ์ทองเหลืองชนิดแผ่นและผลิตภัณฑ์ทองเหลืองชนิดข้อต่อและตัววาล์วที่มีขนาดและคุณสมบัติต่างๆ กันนั้น สามารถนำไปใช้สำหรับเครื่องจักรผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การผลิตกุญแจ บานพับประตู และป้ายต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำทองเหลืองมาทำเป็นอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ท่อทองเหลือง ข้อต่อทองเหลืองวาล์วทองเหลืองที่นำไปใช้ในระบบนิวเมติกส์ เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องฉีดยาฆ่าแมลง และอุตสาหกรรมยานยนต์ สามารถใช้ผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ได้ หลากหลาย และเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยานยนต์ ที่นำทองเหลืองไปผลิตหม้อน้ำรถยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า ที่นำทองเหลืองไปเป็นชิ้นส่วนไฟฟ้า ใช้ผลิตขาปลั๊กไฟ คัทเอาต์ สวิตช์ไฟ สายเคเบิล Connector อุตสาหกรรมผลิต เช่น ตัววาล์วนิวเมติกส์ ข้อต่อและวาล์วต่างๆ ในระบบนิวเมติกส์และ ไฮดรอลิก

2.6.2 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) นั้น ในทางโลหกรรมถือว่าเป็นโลหะผสมเหล็ก ที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุด 10.5% ชื่อในภาษาไทย แปลจากภาษาอังกฤษว่า stainless steel เนื่องจากโลหะผสมดังกล่าวไม่เป็นสนิมที่มีสาเหตุจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง ออกซิเจนในอากาศกับโครเมียมในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม เกิดเป็นฟิล์มบางๆเคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมได้เป็นอย่างดี ปกป้องการกัดกร่อน และไม่ชำระหรือสีกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป สำหรับในสหรัฐอเมริกาและในหลายประเทศ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการบินนิยมเรียกโลหะนี้ว่า corrosion resistant steel เมื่อไม่ได้ระบุชัดว่าเป็นโลหะผสมชนิดใด และคุณภาพระดับใด แต่ในท้องตลาดเราสามารถพบเห็น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 18-8 มากที่สุด ซึ่งเป็น การระบุถึง ธาตุที่เจือลงในเนื้อเหล็กคือ โครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ สแตนเลสประเภทนี้จัดเป็น Commercial Grade คือมีใช้ทั่วไปหาซื้อได้ง่าย มักใช้ทำเครื่องใช้ทั่วไป ซึ่งเราสามารถจำแนกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมได้จากเลขรหัสที่กำหนดขึ้นตามมาตรฐาน AISI เช่น 304 304L 316 316L เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมจะเป็นตัวกำหนดเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป เหล็กกล้าไร้สนิมกับการเกิดสนิม ปกติ Stainless steel จะไม่เป็นสนิมเพราะที่ผิวของมันจะมีฟิล์มโครเมียมออกไซด์ บางๆเคลือบผิวอยู่อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Cr ใน Stainless steel กับ ออกซิเจนในอากาศ การทำให้ Stainless steel เป็นสนิมคือการถูก

ทำลายฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ที่เคลือบผิวออกไปในสภาวะที่ Stainless steel สามารถเกิดสนิมได้ ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้งเช่น ถ้าเหล็กกล้าไร้สนิมถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรายนั้นมีความชื้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็กก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้



รูปที่ 2.16 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless)

ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม

1. กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic) หรือเหล็กกล้าไร้สนิมตระกูล 300 เป็นเกรดที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุดถึง 70% มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กดูดไม่ติด (non - magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 16% คาร์บอนอย่างมากที่สุด 0.15% มีส่วนผสมของธาตุนิเกิล 8% เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการทำการประกอบ(Fabrication)และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน เกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและนิยมเรียก 18/8 คือการที่มีส่วนผสมของโครเมียม 18% และนิเกิล 8%
2. กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic) แม่เหล็กดูดติด(magnetic) มีธาตุคาร์บอนผสมปริมาณที่ต่ำ และมีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักที่สำคัญอาจอยู่ระหว่าง 10.5%-27% และมีนิเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อยมากหรือไม่มีเลย
3. กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic) แม่เหล็กดูดติด(magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 12-14% และมีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ปานกลาง มีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมอยู่ประมาณ 0.2-1% ไม่มีนิเกิล เหล็กกล้าไร้สนิมตระกูลนี้สามารถปรับความแข็งได้โดยการให้ความร้อนแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching)และอบคืนตัว (Tempering) สามารถลดความแข็งได้ คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอน และพบการใช้งานที่สำคัญในการผลิตเครื่องตัด, อุตสาหกรรมเครื่องบินและงานวิศวกรรมทั่วไป
4. กลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening)เกรดที่เป็นที่รู้จักในตระกูลนี้ คือ 17-4H ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียม 17% และนิเกิล 4% สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยกลไกเพิ่มความแข็งจากการตกผลึก (Precipitation hardening)

mechanism) โดยสามารถเพิ่มความแข็งแรงสูงมาก มีค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) อยู่ระหว่าง 1,000 ถึง 1,500 เมก้าปาสคาล (MPa) ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Heat treatment)

5. กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex) มีโครงสร้างผสมระหว่าง โครงสร้างเฟอร์ริติก และออสเทนนิติก มีโครเมียมเป็นธาตุผสมอยู่ระหว่าง 19-28% และโมลิบดีนัมสูงกว่า 5% และมีนิกเกิลน้อยกว่าตระกูลออสเทนนิติก พบว่ามีการใช้งานมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบรรยากาศแวดล้อมของคลอไรด์

2.6.3 อะลูมิเนียม (Aluminum)

โลหะอะลูมิเนียมเป็นธาตุเริ่มเป็นที่รู้จักของมนุษย์เมื่อไม่นานมานี้ โดยมีการค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1820 ณ แหล่งบอกไซต์ ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งต่อมาได้ใช้เป็นชื่อเรียกแร่อะลูมิเนียมจนถึงปัจจุบัน แม้โลหะอะลูมิเนียมจะเป็นธาตุชนิดใหม่ แต่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการและสามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลายประเภท ทำให้การใช้ประโยชน์จากโลหะอะลูมิเนียมมีปริมาณเพิ่มขึ้น มาโดยตลอด จนนับเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดในโลก โดยปัจจุบันมีปริมาณการใช้โลหะอะลูมิเนียมทั่วโลกประมาณ 28 ล้านตันต่อปี คิดเป็นปริมาณการใช้ที่เพิ่มขึ้นจากเมื่อ 20 ปีที่แล้วถึงร้อยละ 75

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของอะลูมิเนียม

น้ำหนักอะตอม	26.98
ความหนาแน่น (ที่ 20 °C)	2.70 g.cm ⁻³
จุดหลอมเหลว	660 °C
จุดเดือด	2,519 °C
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (ที่ 20 °C)	23.1 μm.m ⁻¹ .K ⁻¹
ค่าสภาพนำความร้อน	200 W/mK

การใช้ประโยชน์ของโลหะอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเด่นในหลายด้าน เช่น มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อหน่วยสูง (High Strength to weight ratio) มีคุณสมบัติที่ยึดตัวได้ง่ายและมีความเหนียวมาก ทำให้สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย มีจุดหลอมเหลวต่ำและมีคุณสมบัติการไหลของน้ำโลหะที่ดี ทำให้มีความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อได้ดี มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี มีค่าการนำความร้อนสูง และผิวหน้าของโลหะอะลูมิเนียมมีดัชนีการสะท้อนของแสงสูง ดังนั้นโลหะอะลูมิเนียมจึงนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น

- 1) เนื่องจากอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงเทียบกับน้ำหนักสูง จึงนิยมใช้ทำเครื่องจักรอุปกรณ์ตลอดจนชิ้นส่วนหลายอย่างในเครื่องบิน จรวด และรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักของยานพาหนะให้น้อยลง และช่วยในการประหยัดเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) อะลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ดี ทำให้เกิดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งฟิล์มนี้มีความเหนียวมากจึงช่วยให้สามารถต่อต้านการเป็นสนิมได้ด้วยตัวเองและต้านทานการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศได้ดี ดังนั้นโลหะอะลูมิเนียมจึงนิยมนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้ทำท่อ กรอบประตู กรอบหน้าต่าง และวัสดุก่อสร้างต่างๆ เป็นต้น

3) อะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่น ๆ ได้หลายชนิด เช่น ซิลิกอน ทองแดง แมกนีเซียม และสังกะสี ซึ่งโลหะอะลูมิเนียมผสมแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันทำให้มีขอบเขตการใช้งานที่กว้างขวางมาก

4) ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในงานที่ต้องคำนึงถึงเรื่องน้ำหนักเบาเป็นสำคัญ เช่น สายไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น

5) เหมาะสำหรับใช้ทำเป็นภาชนะหุงต้มหรือหีบห่อบรรจุอาหาร โดยเฉพาะกระป๋องที่บรรจุเครื่องดื่มคาร์บอนเนต เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยปัจจุบันกระป๋องเครื่องดื่มกว่าร้อยละ 97 และกระป๋องเบียร์เกือบทั้งหมดล้วน ทำจากโลหะอะลูมิเนียมทั้งสิ้น

6) ใช้ทำแผ่นสะท้อนแสงในแฟลชถ่ายรูป งานสะท้อนแสงในโคมไพหรือไฟหน้ารถยนต์



รูปที่ 2.17 อะลูมิเนียม (Aluminum)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การพัฒนาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

การสร้างแบบจำลองถือเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาในเทคโนโลยีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง อีกทั้งยังช่วยทำความเข้าใจในกระบวนการพื้นฐานต่างๆ ในวัฏจักรจริง (Real cycle) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ให้ดีขึ้น ในงานชิ้นนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา โดยอาศัยการปรับรูปแบบของการวิเคราะห์อะเดียแบติกไม่อุดมคติ โดยแบบจำลองได้ถูกเทียบผลในการทดลองต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบ (ST05-CNC) ของมหาวิทยาลัยเบอร์มิงแฮม โดยผลการเปรียบเทียบผลที่ดีของแบบจำลองและการทดลองพบในการทำนายกำลังบ่งชี้ (indicated power) กำลังขาพท์ (shaft power) และประสิทธิภาพทางความร้อน ณ สภาพการทำงานต่างๆ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาลักษณะพิเศษของเครื่องยนต์เพื่อศึกษาผลของความต่างเฟสต่อการทำงานของเครื่องยนต์ ชนิดของก๊าซทำงาน ชนิดของรีเจนเนอเรเตอร์ และผลของประมาตตายต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ความเป็นไปได้ของการใช้พลังงานที่เก็บไว้เย็นของ LN2 เพื่อเพิ่มกำลังขาพท์ก็ถูกศึกษาเช่นกัน โดยผลการศึกษาบอถึงกำลังขาพท์ที่เพิ่มขึ้นมีค่าถึง 49 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ฮีเลียม และ 35 เปอร์เซ็นต์ สำหรับไนโตรเจนโดยอุณหภูมิฝั่งเย็นมีค่าลดลงไปถึง -50 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิฝั่งร้อนมีค่าคงที่ที่ 650 องศาเซลเซียส

2.7.2 การเพิ่มประสิทธิภาพกลไกของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์แก๊สสันดาปภายนอกชนิดพิเศษถูกเรียกว่า “เครื่องยนต์สเตอร์ลิง” โดยกลไกของเครื่องยนต์ประกอบด้วยกระบอกสูบสองกระบอกที่มีปริมาตรสองปริมาตรหลัก ลูกสูบทั้งสองถูกติดตั้งเชื่อมกันอยู่ภายในกระบอกสูบฝั่งเย็น รีเจนเนอเรเตอร์ และกระบอกสูบฝั่งร้อน โดยประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้งสอง การเคลื่อนที่เป็นรูปไซน์แบบผิดปกติจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพต่ำ การเคลื่อนที่จากจุดศูนย์ตายบนไปยังจุดศูนย์ตายล่างที่รวดเร็วทำให้มีประสิทธิภาพที่มากขึ้น บทความนี้จะศึกษากลไกเครื่องยนต์ทั้งสามแบบ วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของลูกสูบรวมทั้งพฤติกรรมลูกสูบ

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยในการออกแบบและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาในเรื่องต่างๆเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา อาทิเช่น ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยนต์ และหลักการทำงานของเครื่องยนต์ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาด้วยโปรแกรม SolidWorks

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่ได้ออกแบบขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบและวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น

ตารางที่ 3.1 การดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินการ	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1) ศึกษาข้อมูล												
2) ออกแบบเครื่องยนต์												
3) ผลิตเครื่องยนต์												
4) ทดสอบและวิเคราะห์												

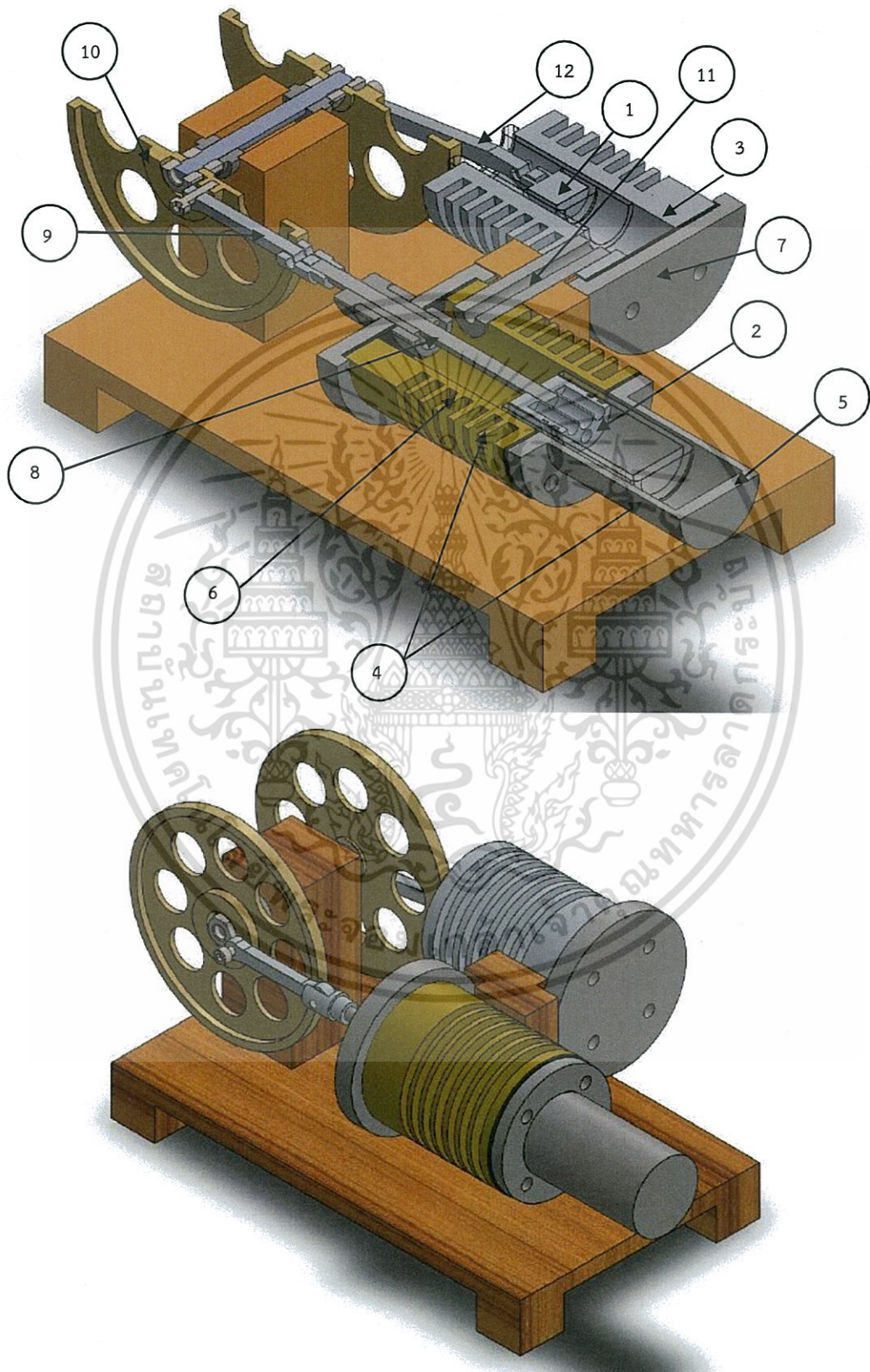
3.1 การศึกษาส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาต้นแบบ

ในการศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาจากเครื่องยนต์ต้นแบบ สามารถแบ่งส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยนต์ออกมาได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักอย่าง ลูกสูบกำลัง (1) ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (2) ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะทำงานแยกกันอยู่ภายใน กระจบอกลูกสูบกำลัง (3) และ กระจบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (4) ตามลำดับ โดยกระจบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์สามารถแยกออกเป็นสามส่วนหลักๆได้แก่ ฮีตเตอร์ (5) ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับความร้อนซึ่งทำมาจากสแตนเลส ฮีตซิงค์(6) ที่เป็นทองเหลือง และบูช (7) ซึ่งทำหน้าที่ในการซีลเพื่อป้องกันอากาศรั่วไหลทั้งในกระจบอกลูกสูบ ดิสเพลสเซอร์และกระจบอกลูกสูบกำลัง ลูกสูบดิสเพลสเซอร์จะต่อแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (8) ออกมาต่อกับข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์ (9) ทำหน้าที่เป็นส่วนสำคัญในการส่งถ่ายแรงจากการบีบอัดและขยายตัวของอากาศในกระจบอกลูกสูบดิสเพลสเซอร์ไปยังล้อตุ่นกำลัง (10) โดยการบีบอัดนี้จะทำให้เกิดความดันไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

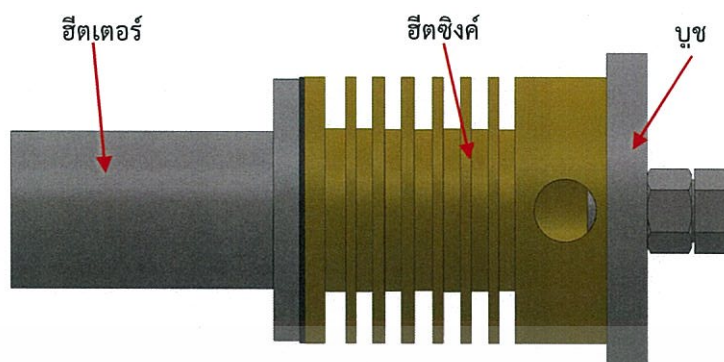
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านท่ออากาศ (11) ไปผลักลูกสูบกำลังให้เคลื่อนที่ส่งถ่ายแรงให้กับข้อเหวี่ยงกำลัง (12) ไปกระตุ้นล้อ
 ดุนกำลังให้หมุนอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.1 องค์ประกอบต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์



รูปที่ 3.2 ครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (4)

จากรูปที่ 3.2 คือส่วนของครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์ซึ่งสามารถแบ่งเป็นส่วนประกอบย่อยได้อีกสามส่วนคือ ฮีตเตอร์(5) ฮีตซิงค์(6) และบูช(7) โดยฮีตเตอร์ทำจากสแตนเลส ฮีตซิงค์ทำจากทองเหลืองและบูชทำจากเหล็ก

ขนาดของครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์(4)

ความยาวของครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์

$$l_{Cy,d} = 120 \text{ mm}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของครอบอกสูบดิสเพลสเซอร์

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

ฮีตเตอร์เป็นส่วนที่ถูกให้ความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายนอกเพื่อทำให้อากาศในกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์เกิดการขยายตัว

ขนาดของฮีตเตอร์(5)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฮีตเตอร์

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

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของฮีตเตอร์

$$d_{in,ht} = 25 \text{ mm}$$

ความยาวของฮีตเตอร์

$$l_{ht} = 60 \text{ mm}$$

ฮีตซิงค์เป็นส่วนของครอบอกสูบที่ทำการกึ่งเงาะร่องลงไปเพื่อทำให้มีพื้นที่ให้อากาศไหลผ่านกระบอกสูบมากขึ้นเพื่อระบายความร้อน

ขนาดของฮีตซิงค์(6)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฮีตซิงค์

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

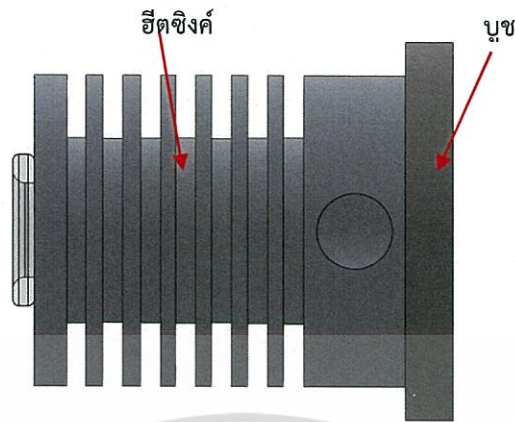
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของฮีตซิงค์

$$d_{in,hs} = 25 \text{ mm}$$

ความยาวของฮีตซิงค์

$$l_{hs} = 60 \text{ mm}$$

3.1.2 ครอบอกสูบกำลัง



รูปที่ 3.3 ครอบอกสูบกำลัง (3)

ขนาดของลูกสูบกำลัง(3)

ความยาวของครอบอกสูบกำลัง	$l_{cy,p} = 60$	mm
ปริมาตรภายในครอบอกสูบกำลัง	$V_{cy,p} = A_p l_{cy,p} = 15,268.140$	mm ³
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของครอบอกสูบ	$d_{cy,p} = 50$	mm

3.1.3 ลูกสูบติสเพลสเซอร์และแกนลูกสูบติสเพลสเซอร์



รูปที่ 3.4 ลูกสูบติสเพลสเซอร์ (2) และแกนลูกสูบติสเพลสเซอร์ (8)

ขนาดของลูกสูบติสเพลสเซอร์(2)

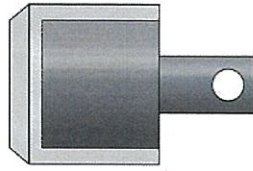
เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบติสเพลสเซอร์	$d_d = 23$	mm
พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบติสเพลสเซอร์	$A_d = \pi \left(\frac{d_d}{2} \right)^2 = 415.47$	mm ²
ความยาวของลูกสูบติสเพลสเซอร์	$l_d = 60$	mm

ขนาดของแกนลูกสูบติสเพลสเซอร์(8)

เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนลูกสูบติสเพลสเซอร์	$d_{core,d} = 5$	mm
ความยาวของแกนลูกสูบติสเพลสเซอร์	$l_{core,d} = 125$	mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ลูกสูบกำลัง



รูปที่ 3.5 ลูกสูบกำลัง (1)

ขนาดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์(2)

เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ $d_d = 18 \text{ mm}$

พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ $A_d = \pi \left(\frac{d_d}{2} \right)^2 = 254.47 \text{ mm}^2$

ความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ $l_d = 14 \text{ mm}$

3.1.5 ข้อเหวี่ยง



รูปที่ 3.6 ข้อเหวี่ยง

จากรูปที่ 3.6 ข้อเหวี่ยงเป็นส่วนที่เชื่อมระหว่างแกนลูกสูบกับล้อตุนกำลังซึ่งมีสองชิ้นคือ ข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์(9) และข้อเหวี่ยงกำลัง(12) โดยข้อเหวี่ยงกำลังนั้นจะเชื่อมต่อโดยตรงกับลูกสูบกำลังโดยไม่มีแกนลูกสูบ

ขนาดข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์(9)

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

ระยะระหว่างรูข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์ $l_{rod,d} = 40 \text{ mm}$

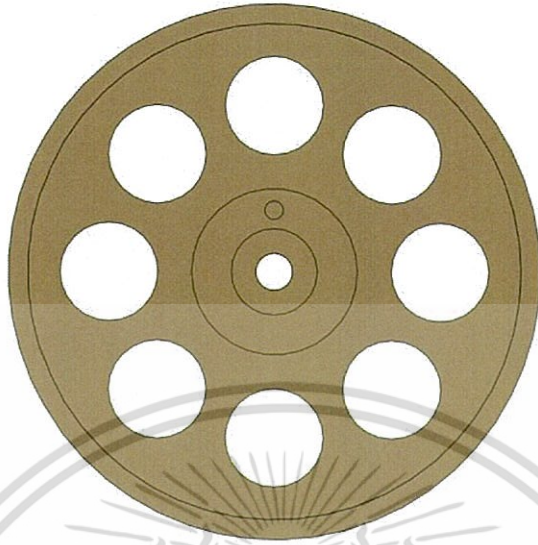
ขนาดข้อเหวี่ยงกำลัง(12)

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

ระยะระหว่างรูข้อเหวี่ยงกำลัง $l_{rod,p} = 65 \text{ mm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 ล้อตุ๋นกำลัง



รูปที่ 3.7 ล้อตุ๋นกำลัง (10)

ขนาดของล้อตุ๋นกำลัง(10)

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของล้อตุ๋นกำลัง

ความหนาของล้อตุ๋นกำลัง

$$d_{\text{wheel}} = 87 \text{ mm}$$

$$l_{\text{wheel}} = 6.5 \text{ mm}$$

3.1.7 ท่ออากาศ



รูปที่ 3.8 ท่ออากาศ (11)

ขนาดของท่ออากาศ(11)

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของท่ออากาศ

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่ออากาศ

ความยาวของท่ออากาศ

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

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

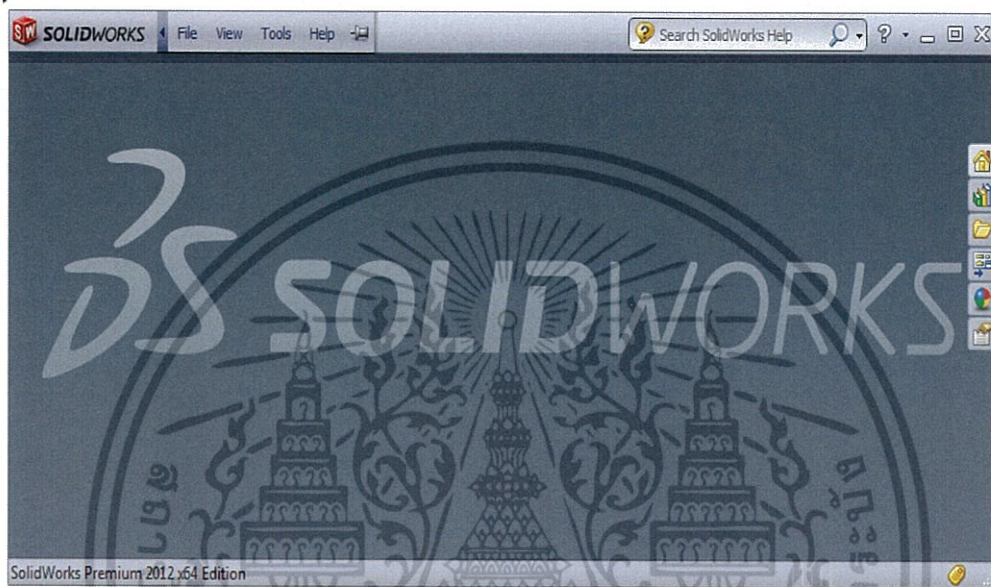
$$l_{\text{tube}} = 50.6 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาโดยใช้โปรแกรม SolidWorks

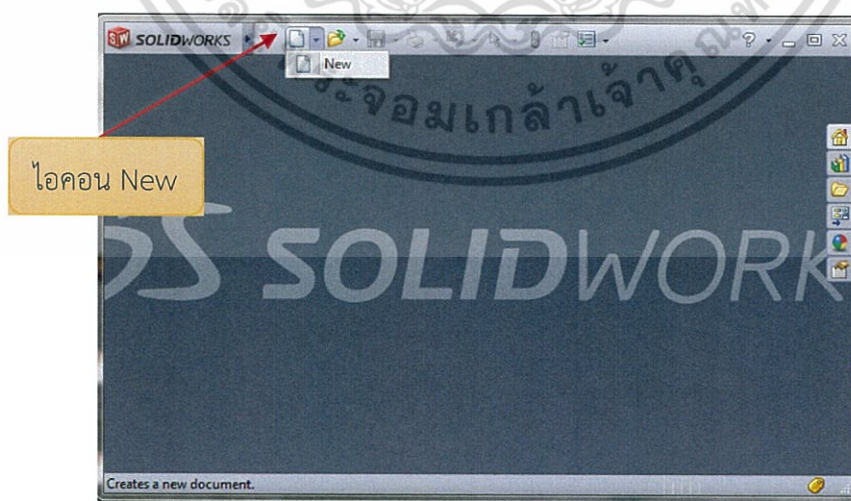
SolidWorks เป็นโปรแกรมสำหรับช่วยเขียนแบบที่เน้นการเขียนแบบทั้งในแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติและสามารถจำลองการเคลื่อนที่จากแบบได้ การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมาจึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรม Solid Work เพื่อให้ได้การออกแบบกลไกเครื่องตามที่ต้องการ พร้อมกับวิเคราะห์ลักษณะการทำงานไปพร้อมๆกัน

ในการใช้งานเมื่อคลิกไอคอนsolid work  จะมีการปรากฏหน้าต่าง solid worksดังรูป



รูปที่ 3.9 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (1)

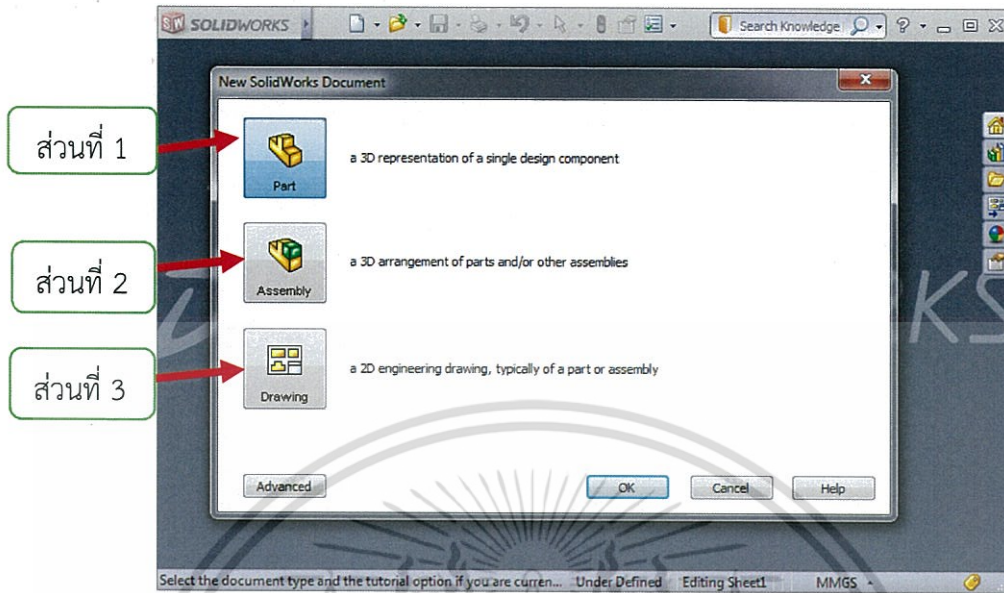
การเริ่มวาดภาพหรือเริ่มการวาดใหม่ ทั้งในแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ ให้เลือกที่ไอคอน New



รูปที่ 3.10 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นจะปรากฏหน้าต่างดังรูป ที่ประกอบด้วยนามสกุลไฟล์ต่างๆ



รูปที่ 3.11 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (3)

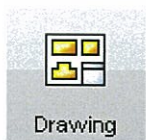
จากรูปที่ 3.11 รายละเอียดของแต่ละส่วนเป็นดังนี้



ส่วนที่ 1 เป็นไฟล์ใช้สร้างชิ้นส่วน(Part) สามารถสร้างให้เป็น 3 มิติ ซึ่งมีได้แค่ชิ้นงานเดียว



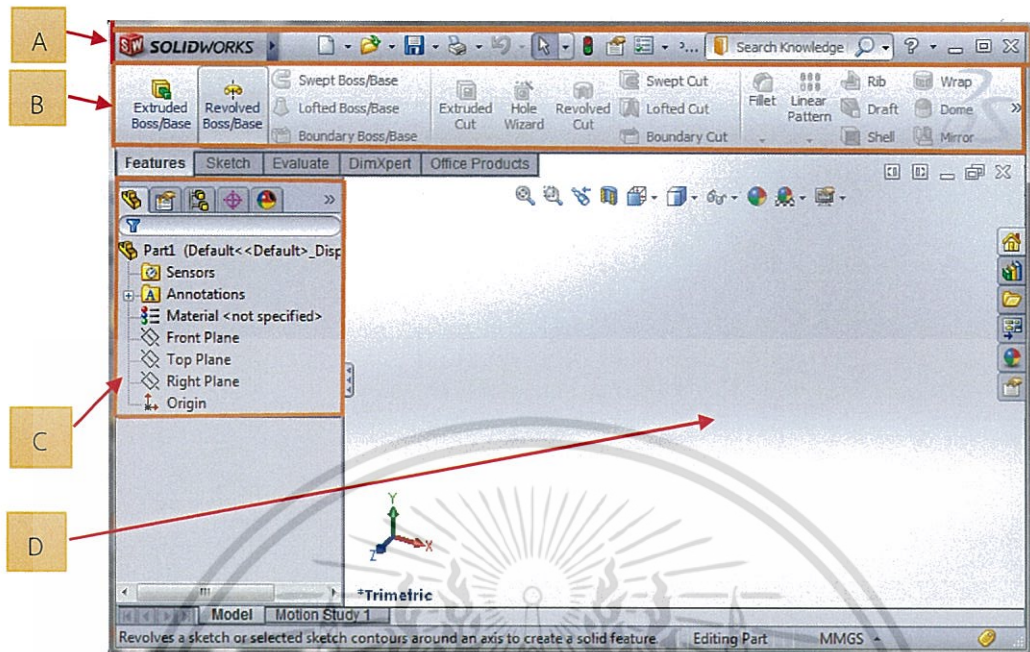
ส่วนที่ 2 เป็นไฟล์ที่นำเอาชิ้นงานมาประกอบกัน (Sub-assemblies) ชิ้นงานจะมีตั้งแต่ 2 ชิ้นขึ้นไป



ส่วนที่ 3 เป็นการนำไฟล์ส่วนที่ 1 หรือ 2 มาเขียนแบบสั่งงานผลิต(drawing) ในภาพแบบ 2 มิติ เพื่อนำไฟล์ไปทำต่อให้เป็นชิ้นงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

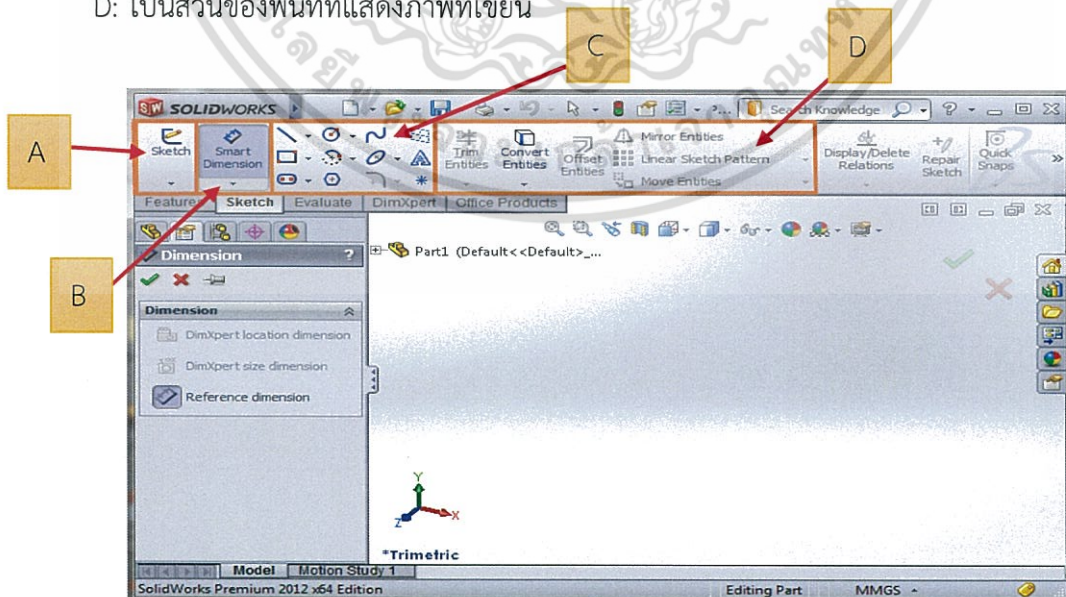
การออกแบบเบื้องต้นด้วยโหมด Part ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3.12 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (4)

รูปที่ 3.12 มีรายละเอียดดังนี้

- A: เป็นเมนูหลักของคำสั่งโปรแกรม ส่วนนี้จะมียูเอไอในลักษณะ Top-Down Menu
- B: เป็นคำสั่งโหมดเครื่องมือที่ต้องใช้งาน ที่ใช้เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งคำสั่งจะมีตัวอักษรกำกับในด้านล่างถือเป็นคำสั่งหลักในการเขียนรูป 3 มิติ
- C: เป็นส่วนจัดระบบขั้นตอนของการวาดงานในแต่ละลำดับ เพื่อแก้ไขและติดตามงาน
- D: เป็นส่วนของพื้นที่ที่แสดงภาพที่เขียน



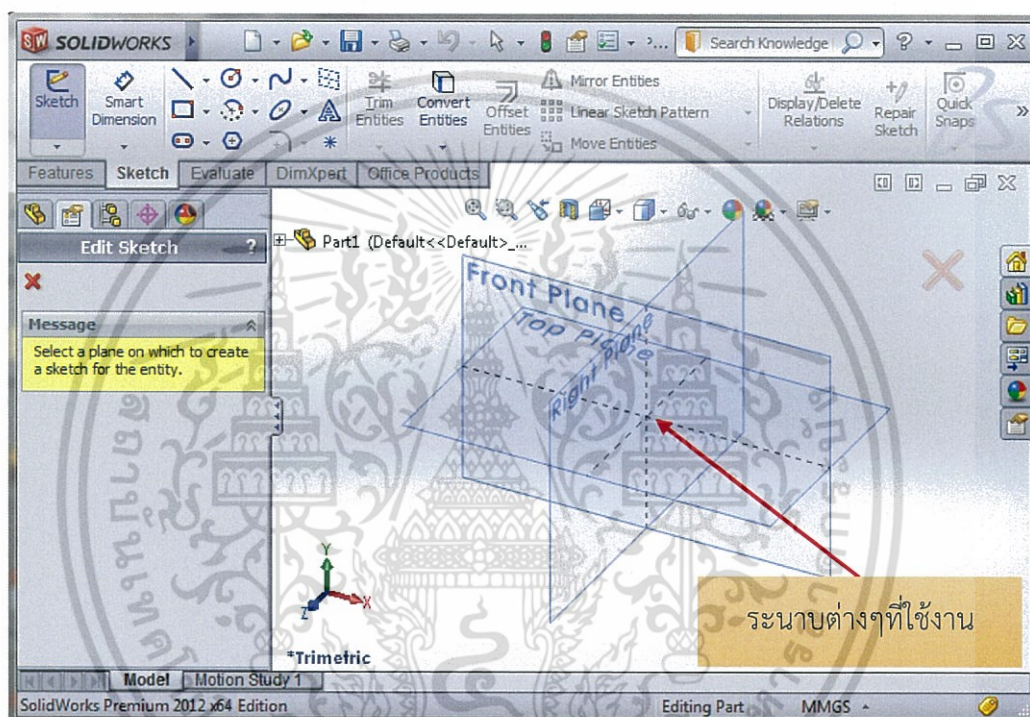
รูปที่ 3.13 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแบบงานที่เป็น 2 มิติและ 3 มิติ ในการวาดรูปจะมี Toolbars สำหรับ Solid Works ดังรูปที่ 4

- A เป็นช่องคำสั่งเมื่อต้องเขียนภาพ 2 มิติ ในระนาบหรือผิวที่เรียบ (Sketch)
- B เป็นช่องคำสั่งในการให้ขนาดภาพ (Smart Dimension)
- C เป็นช่องชุดคำสั่งในทางเรขาคณิต
- D เป็นช่องชุดคำสั่งออกแบบเส้นที่วาดมาก่อน

เริ่มต้นการวาดด้วยการคลิก ในส่วนการทำงานของ A (Sketch) หน้าจอจะขึ้นระนาบให้เลือก เป็นระนาบที่ใช้งานจริงเหมือนรูปที่ 6



รูปที่ 3.14 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

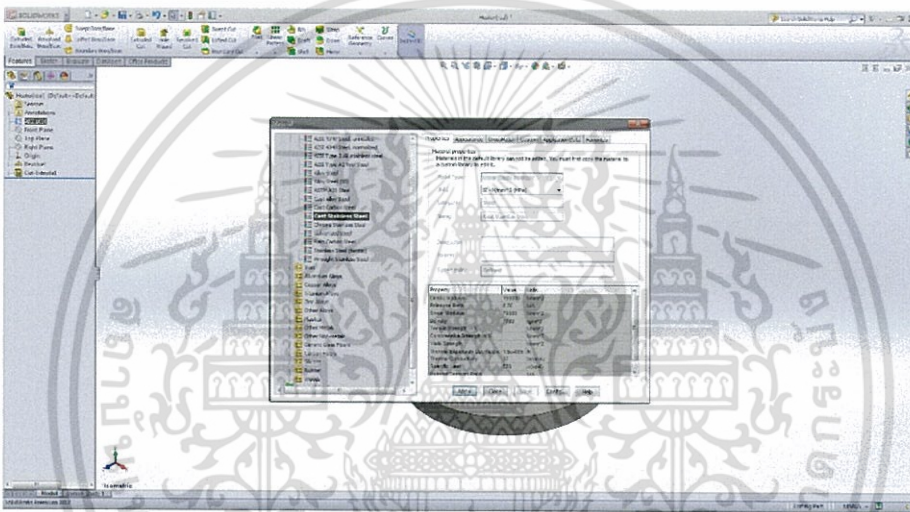
การออกแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์ด้วยโปรแกรม Solid Works

3.2.1 กระบอกลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์

กระบอกลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์มีส่วนประกอบย่อยอยู่ 3 ส่วน ประกอบไปด้วย ฮีตเตอร์ ฮีทซิงค์ ดีเซลเพลสเซอร์ และดีเซลเพลสเซอร์บูช ซึ่งตรงรอยต่อจะใช้โปเกนทนความร้อนในการวางกันเพื่อลดการรั่วไหลของอากาศ โดยมีขั้นตอนการสร้างโมเดลใน SolidWorks ดังนี้

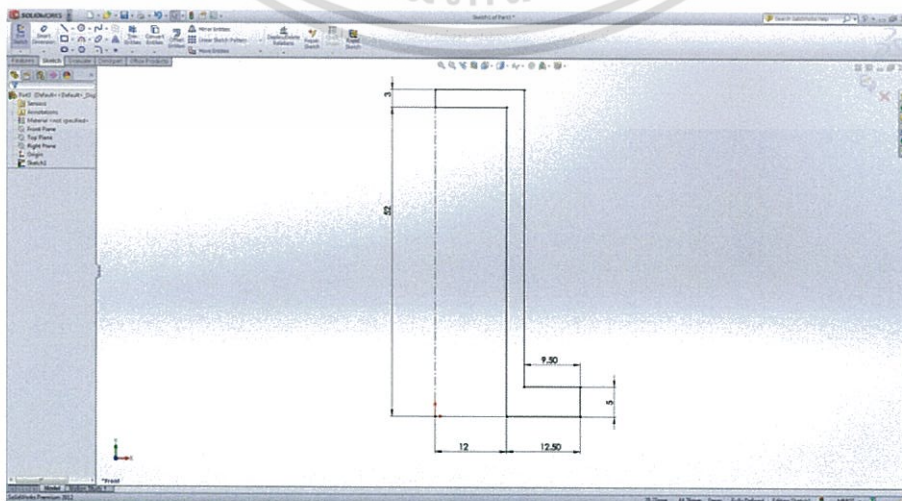
- ฮีตเตอร์

1. ทำการเปิดทำงานแล้วทำการตั้งค่าวัสดุของชิ้นงานโดยคลิกขวาที่ “Material” แล้วเลือก “Edit material” จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.15 จากนั้นเลือกวัสดุเป็น “Cast stainless steel”



รูปที่ 3.15 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (7)

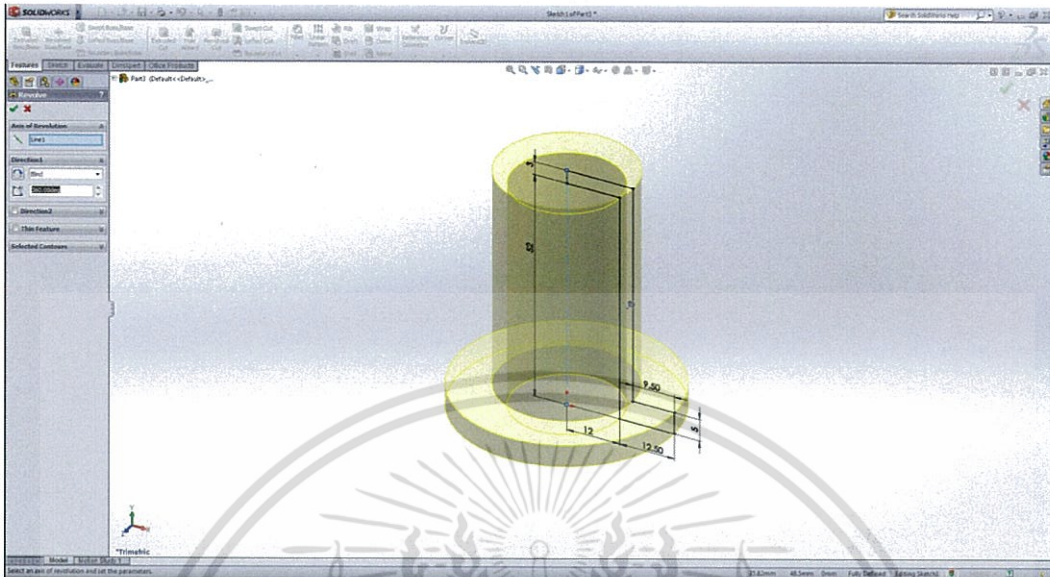
2. ใช้คำสั่ง “Sketch” โดยเลือกใช้ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดและใช้คำสั่ง “Smart dimension” กำหนดสเกลดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับผู้ใช้งานที่อาจมีความต้องการที่ไม่สอดคล้องกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base” ในการขึ้นรูปสามมิติ



รูปที่ 3.17 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (9)

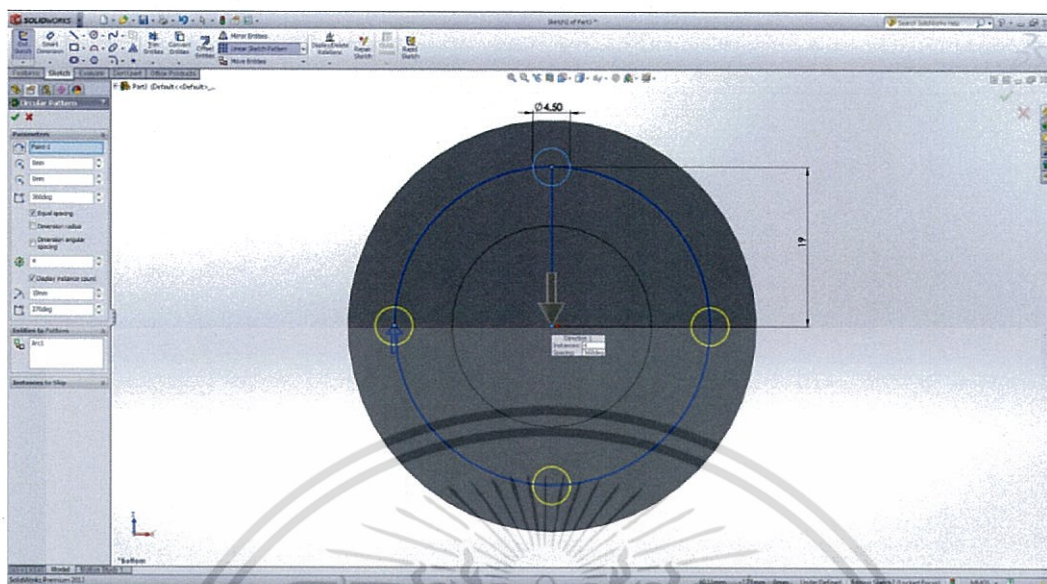
4. เลือก “Bottom view” แล้ววาดรูปวงกลมโดยใช้คำสั่ง “Circle” และกำหนดขนาดดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้คำสั่ง “Circular pattern” ในการวาดวงกลมที่เหลือดังรูป



รูปที่ 3.19 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (11)

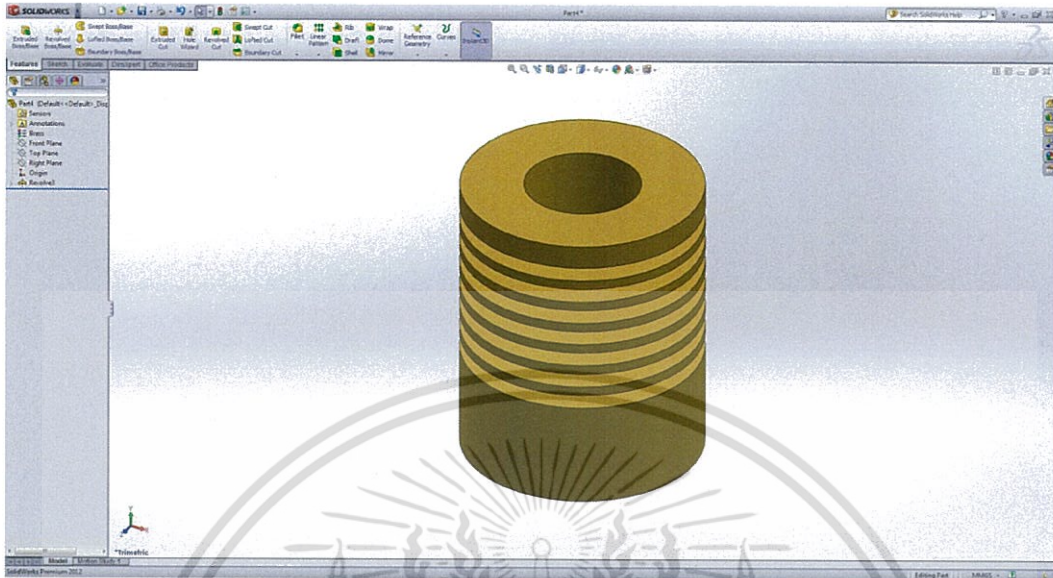
6. ใช้คำสั่ง “Extrude cut” ตัดทะลุวงกลมที่วาดขึ้นดังรูปที่ 3.20 จะได้ชิ้นงานฮีเตอร์ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base” ในการขึ้นรูปสามมิติ



รูปที่ 3.23 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (15)

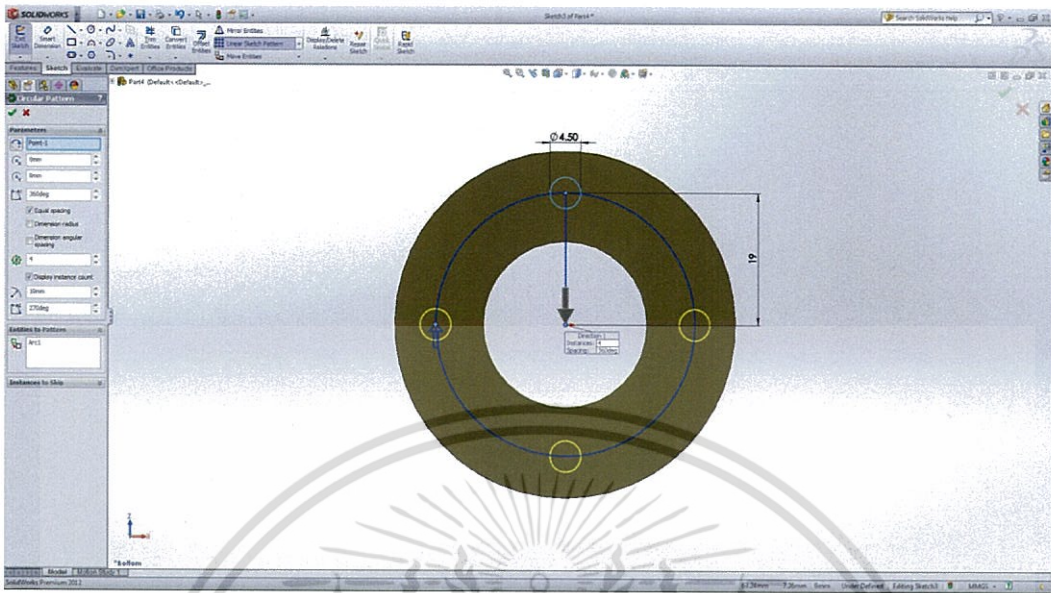
3. เลือก “Bottom view” แล้ววาดรูปวงกลมโดยใช้คำสั่ง “Circle” และกำหนดขนาดดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้คำสั่ง “Circular pattern” ในการวาดวงกลมที่เหลือดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (17)

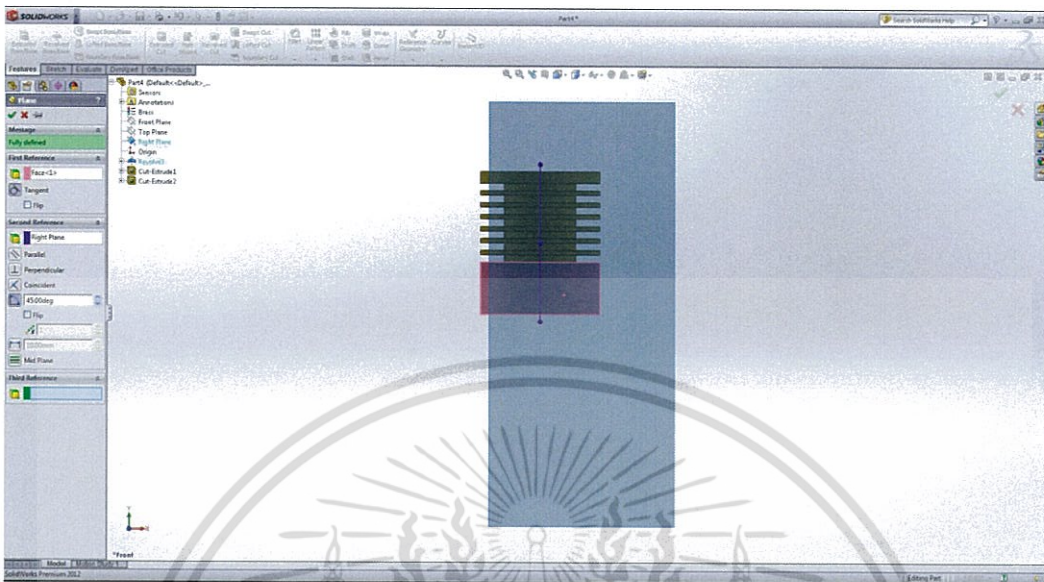
5. ใช้คำสั่ง “Extrude cut” โดยตัดแบบ “Up to next” โดยทำซ้ำขั้นตอนที่ 4-5 ที่ด้าน Top ของชิ้นงาน



รูปที่ 3.26 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (18)

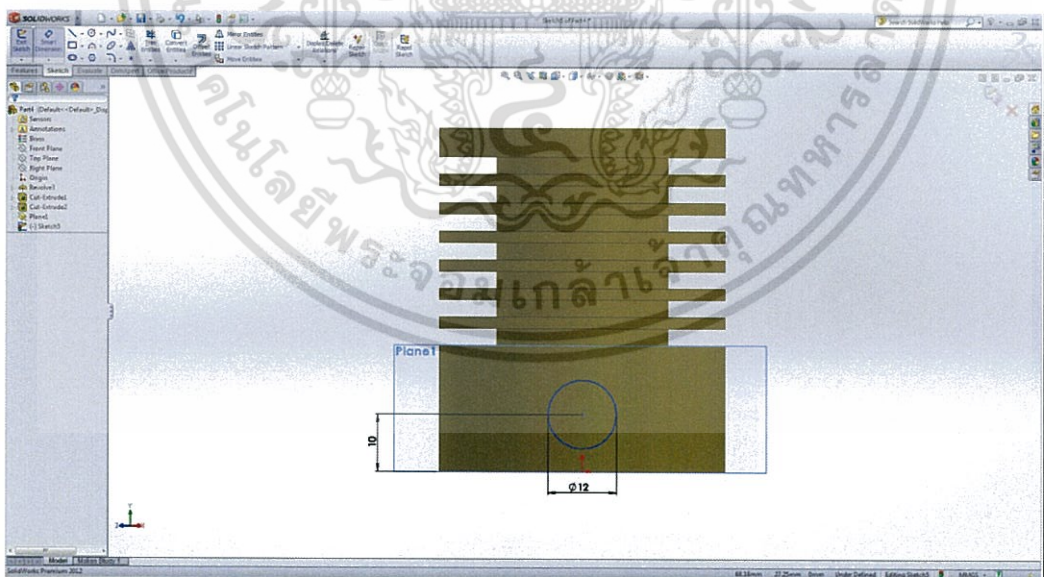
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สร้าง Plane ใหม่โดย เลือก “Reference geometry” จากนั้นเลือก “Plane” แล้วกำหนด Condition ดังรูป



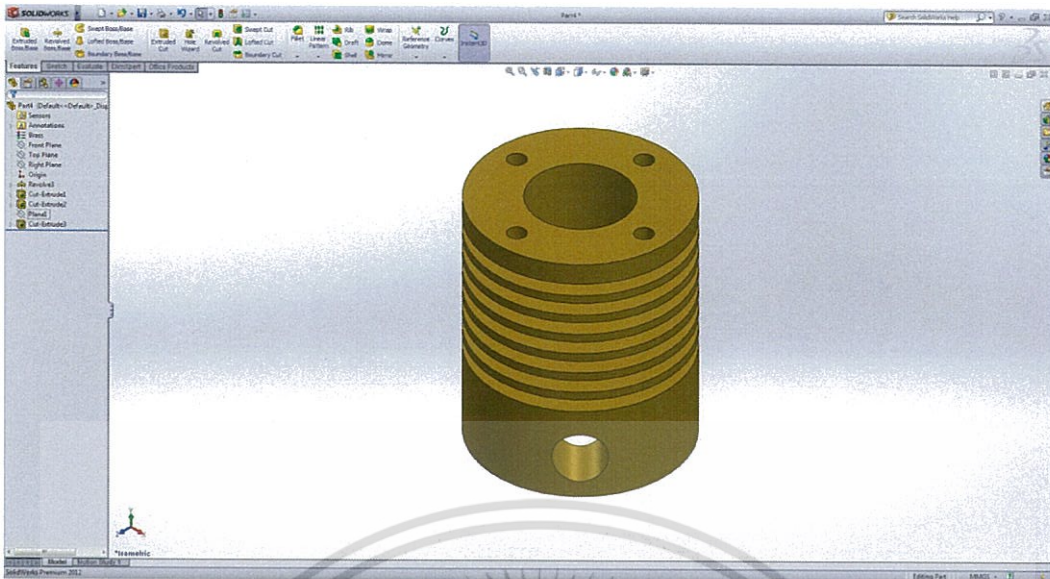
รูปที่ 3.27 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (19)

7. ใช้คำสั่ง “Sketch” ที่ Plane ใหม่ที่สร้างขึ้นมา โดยวาดรูปวงกลมแล้วกำหนดสเกลดังรูป จะได้ชิ้นงานดิสเพลสเซอร์ฮีตซิงค์ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 3.28 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (20)

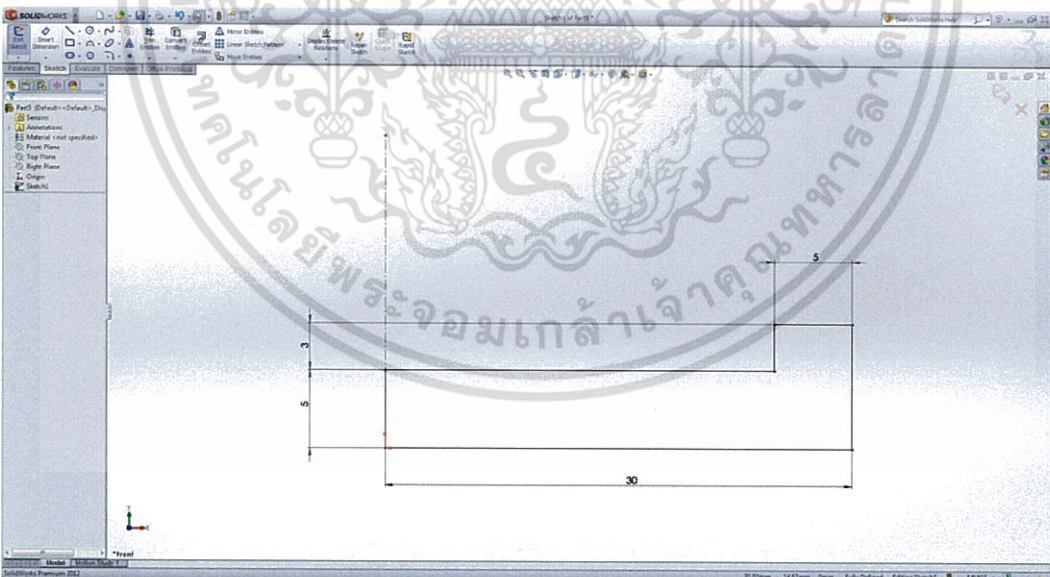
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (21)

- ดิสเพลสเซอร์บูช

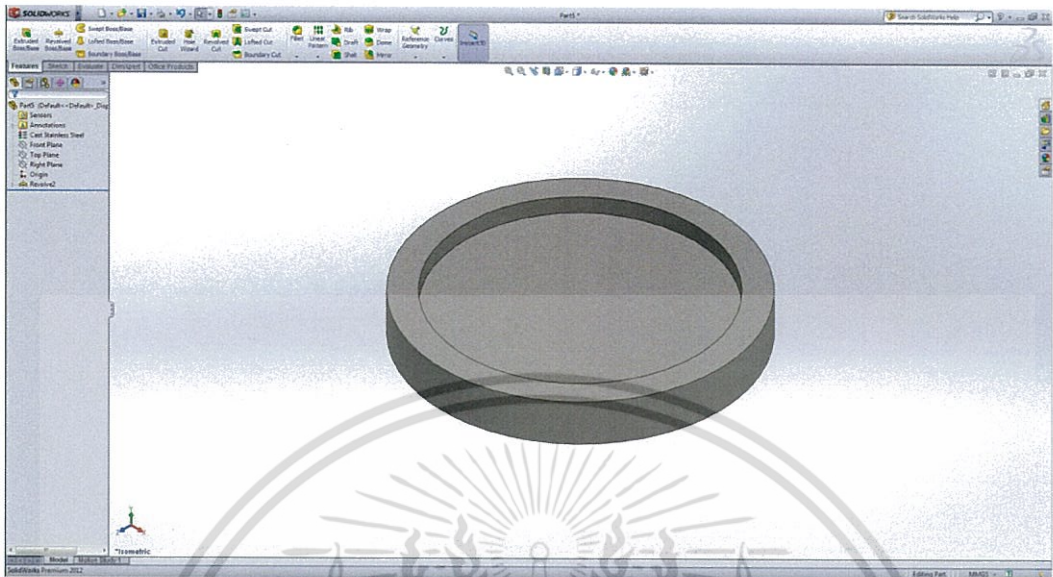
1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “Cast stainless steel” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (22)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base” ในการขึ้นรูปสามมิติ



รูปที่ 3.31 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (23)

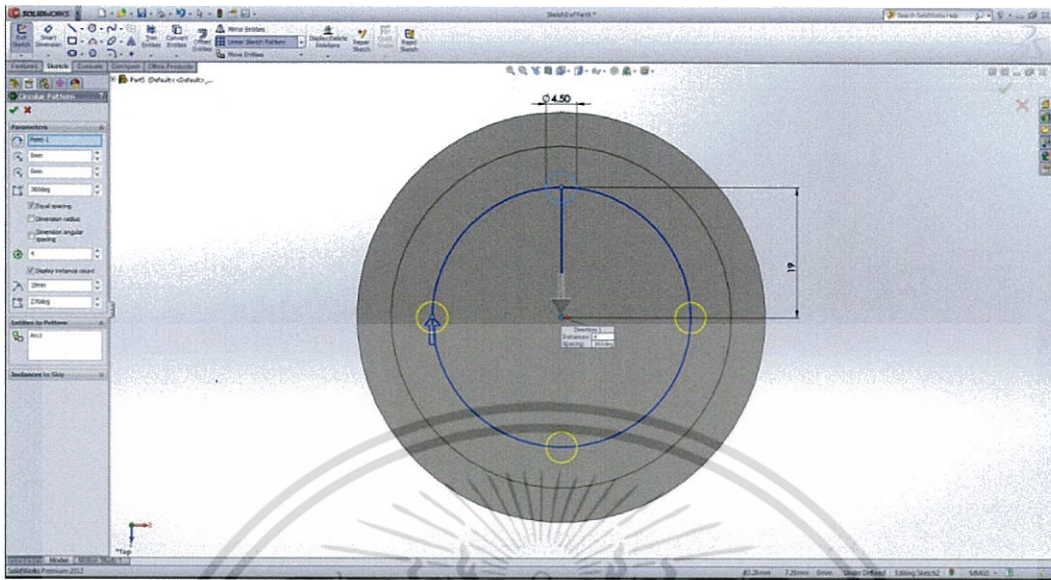
3. เลือก “Bottom view” แล้ววาดรูปวงกลมโดยใช้คำสั่ง “Circle” และ กำหนดขนาดดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (24)

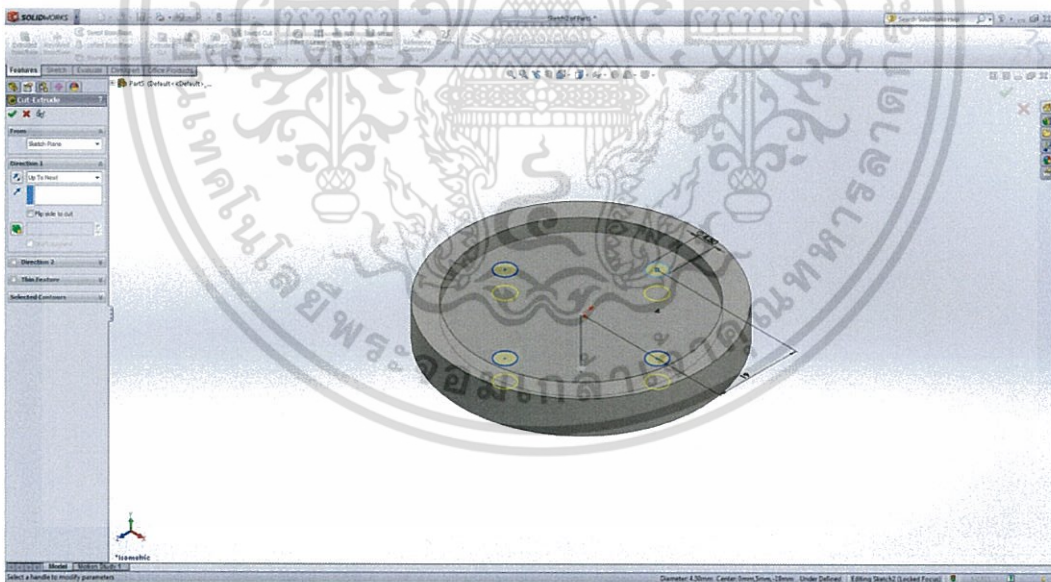
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้คำสั่ง “Circular pattern” ในการวาดวงกลมที่เหลือดังรูปที่ 3.33



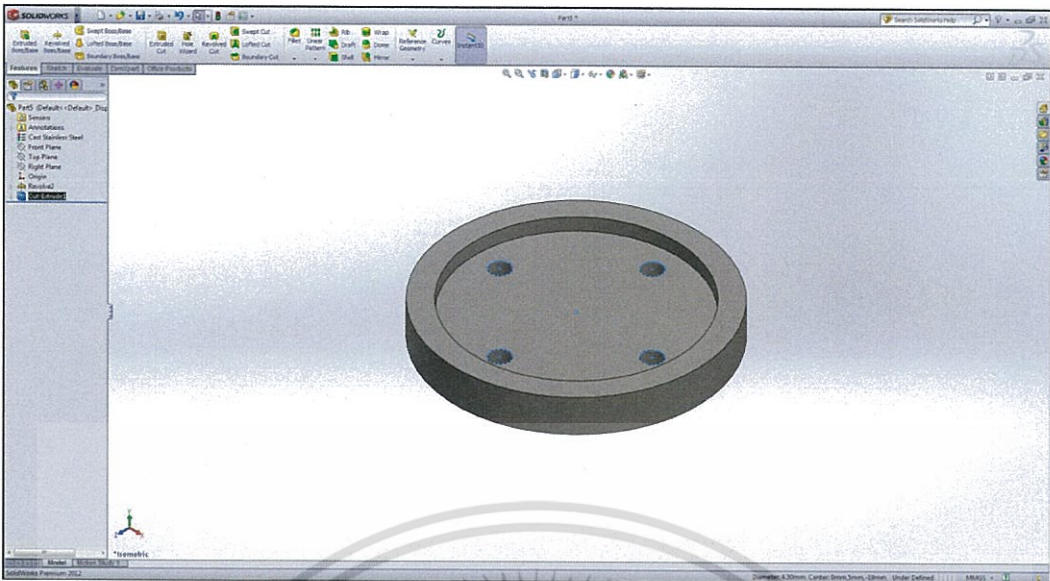
รูปที่ 3.33 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (25)

5. ใช้คำสั่ง “Extrude cut” โดยตัดแบบ “Up to next” จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.34 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (26)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (27)

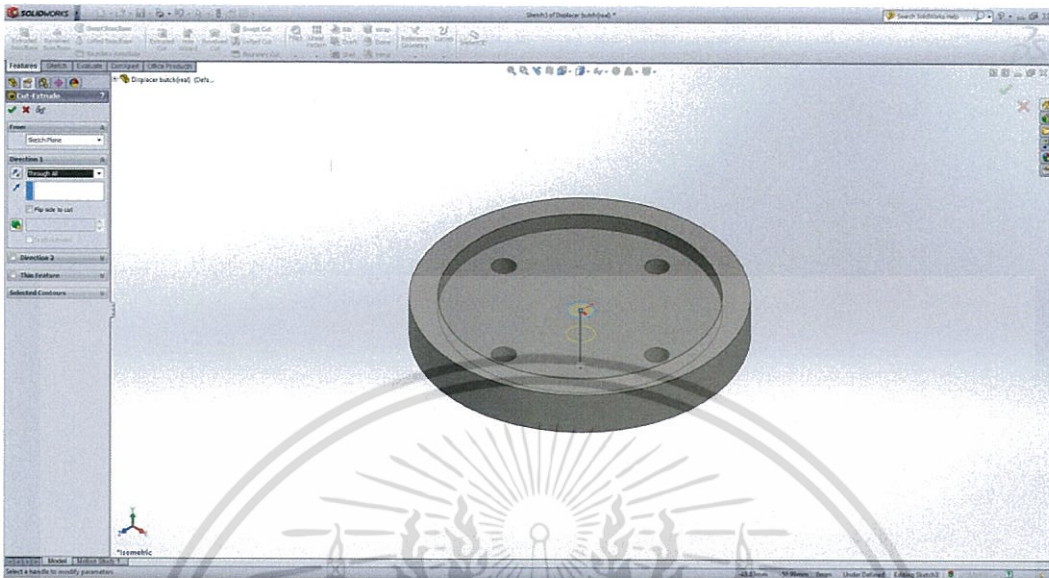
6. Sketch วงกลมตั้งรูป



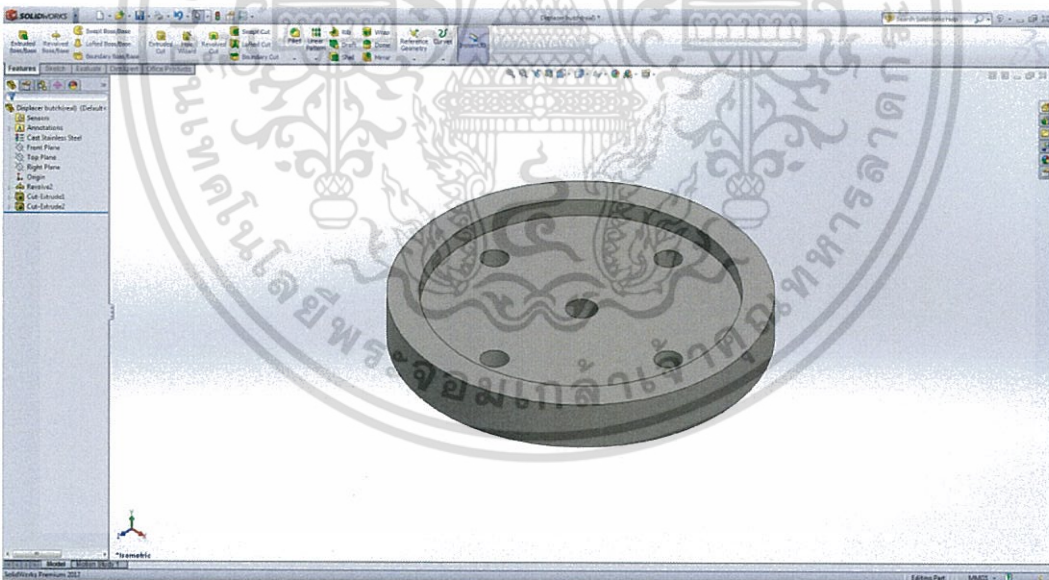
รูปที่ 3.36 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ใช้คำสั่ง “Extrude cut” โดยตัดแบบ “Up to next” ดังรูป ซึ่งจะได้ชิ้นงาน ดิสเพลสเซอร์บูชดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.37 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (29)



รูปที่ 3.38 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (30)

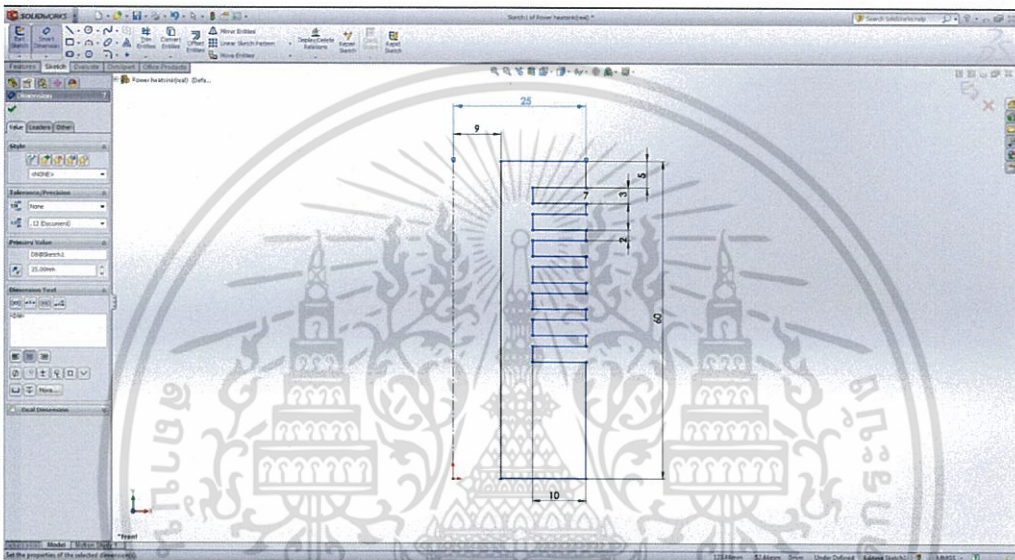
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ครอบอกสูบกำลัง

ครอบอกสูบกำลังประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อยคือ ฮีทซิงค์กำลัง แก้วผิวภายในครอบอกสูบกำลัง และบูช โดยใช้ไปเกนทไฟในการเชื่อมรอยต่อเพื่อกันการรั่วของอากาศ ซึ่งมีวิธีการสร้างชิ้นงานสามมิติดังนี้

- ฮีตเตอร์กำลัง

1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “1060 Aluminium alloy” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.39



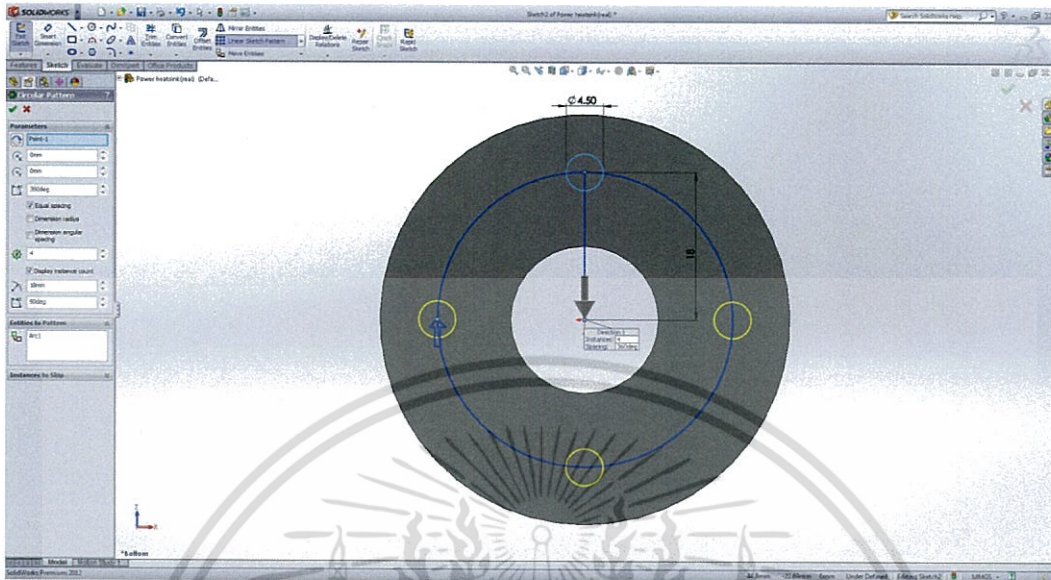
รูปที่ 3.39 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (31)

2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base” ในการขึ้นรูปสามมิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.40 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (32) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือก “Bottom view” แล้ววาดรูปวงกลมโดยใช้คำสั่ง “Circle” และกำหนดขนาด จากนั้นใช้คำสั่ง “Circular pattern” ในการวาดรูปวงกลมที่เหลือดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (33)

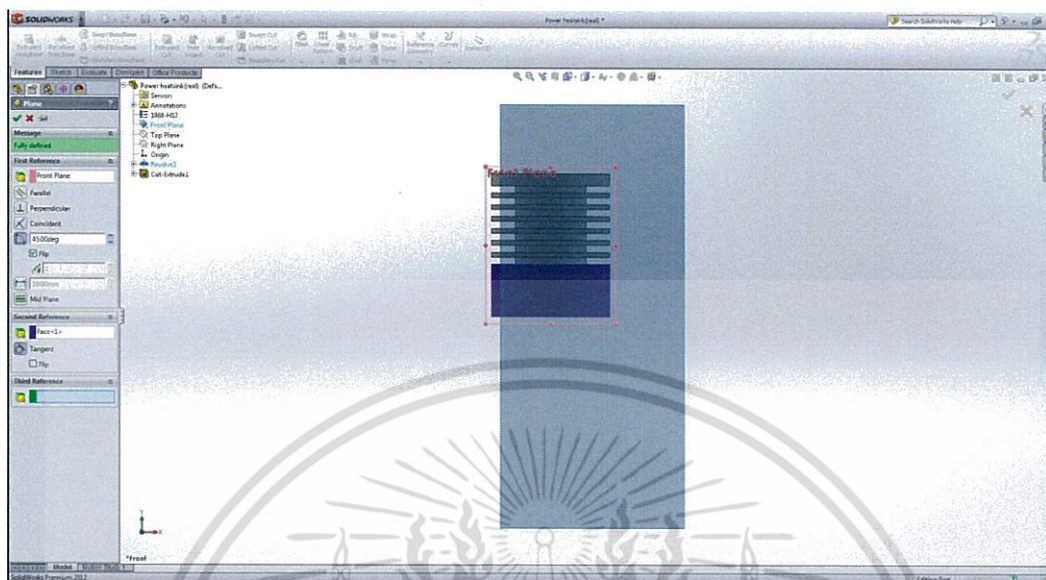
4. ใช้คำสั่ง “Extrude cut” โดยตัดแบบ “Up to next”



รูปที่ 3.42 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (34)

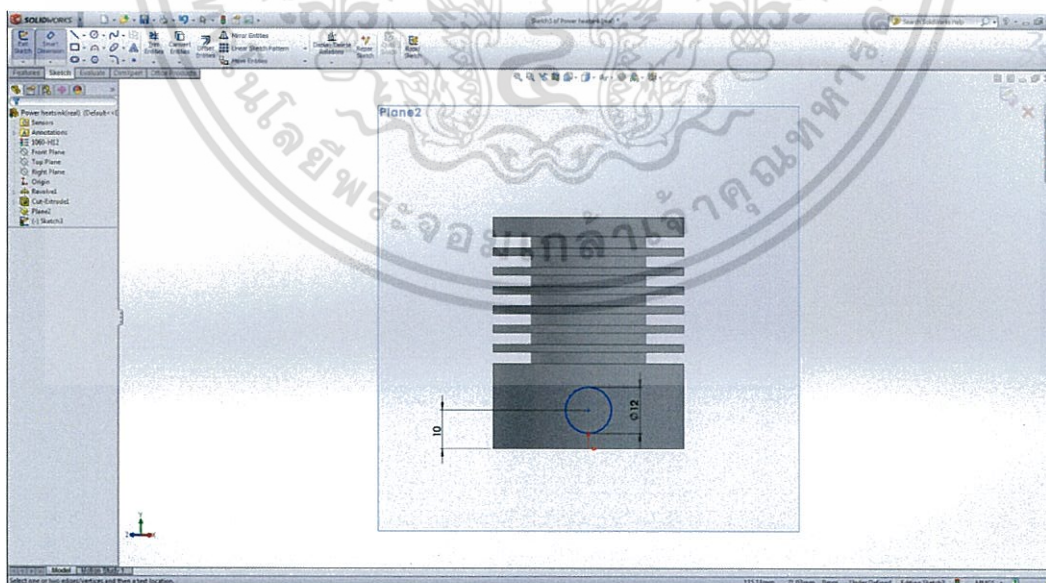
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สร้าง Plane ใหม่โดย เลือก “Reference geometry” จากนั้นเลือก “Plane” แล้วกำหนด Condition ดังรูป



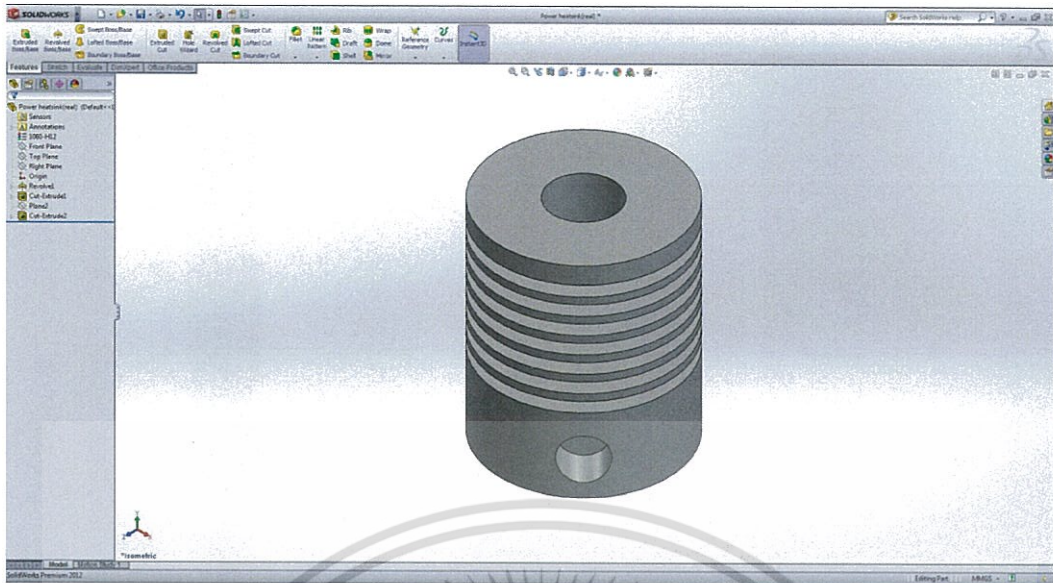
รูปที่ 3.43 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (35)

6. ใช้คำสั่ง “Sketch” ที่ Plane ใหม่ที่สร้างขึ้นมา โดยวาดรูปวงกลมแล้วกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.44 จากนั้นใช้คำสั่ง “Extruded cut” โดยตัวแบบ “Up to next” จะได้ชิ้นงานฮีตซิงค์กำลังดัง รูปที่ 3.45



รูปที่ 3.44 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (36)

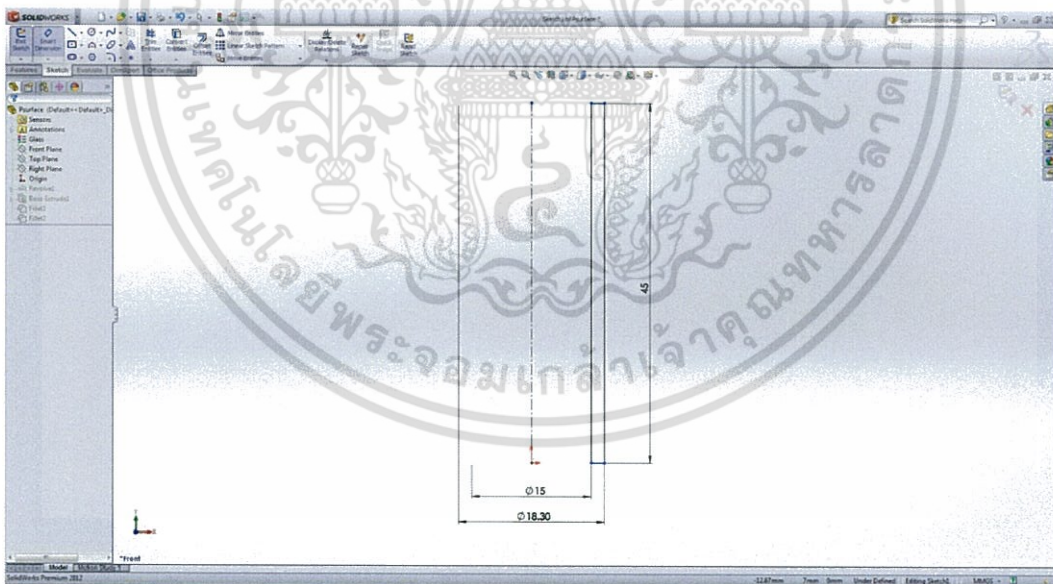
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.45 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (37)

- แก้วผิวภายในกระบอกสุบกำลัง

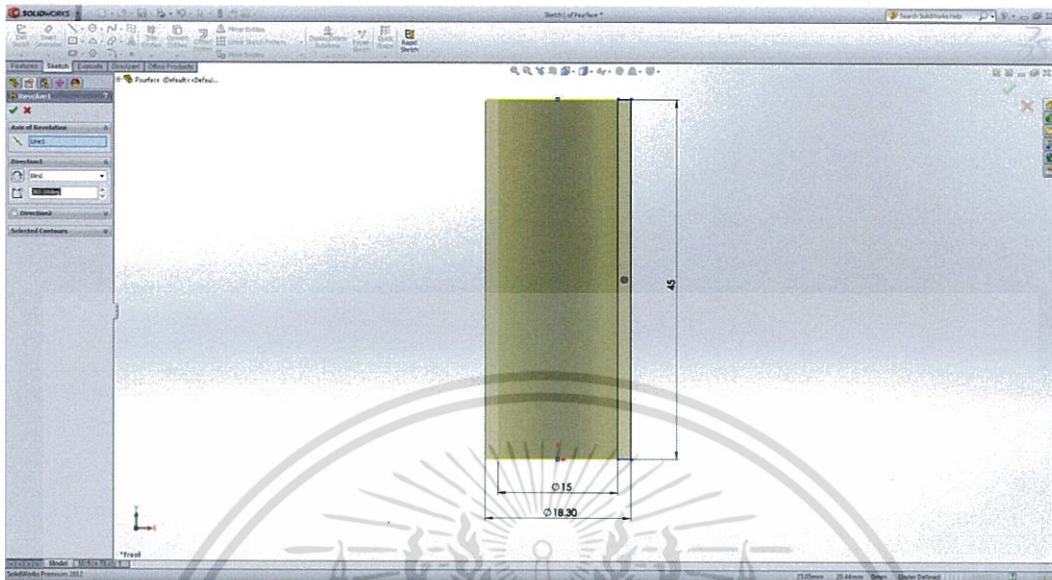
1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “Glass” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลตั้งรูป



รูปที่ 3.46 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (38)

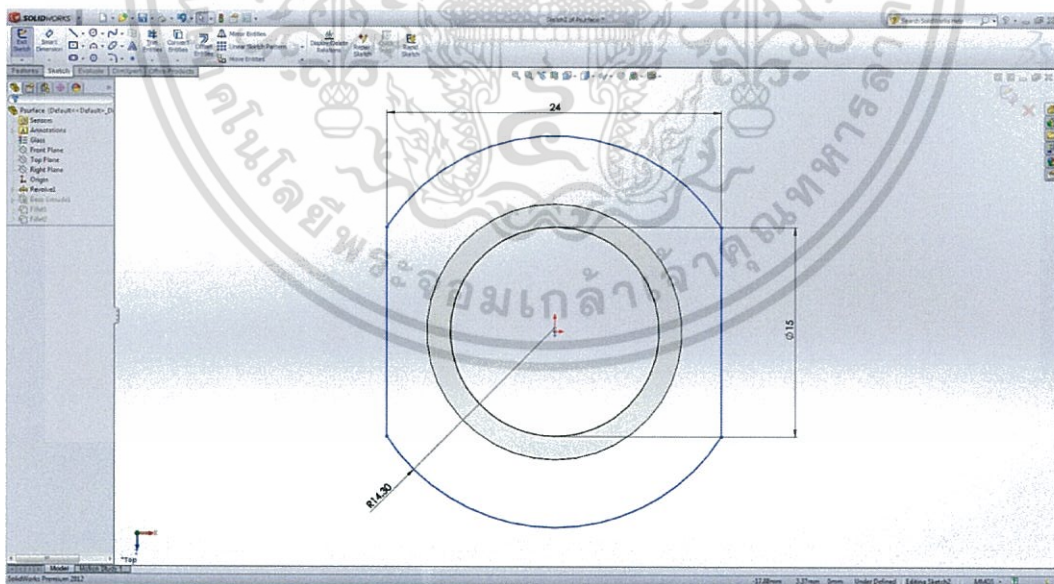
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base” ในการขึ้นรูปสามมิติ



รูปที่ 3.47 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (39)

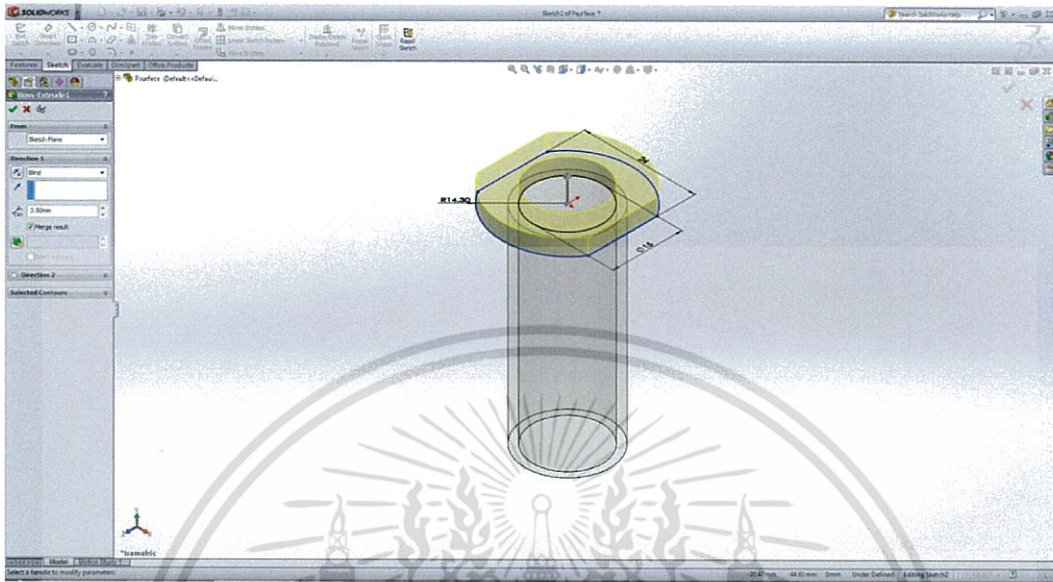
3. ใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปที่ขอบด้านบนของชิ้นงานและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลตั้งรูป



รูปที่ 3.48 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (40)

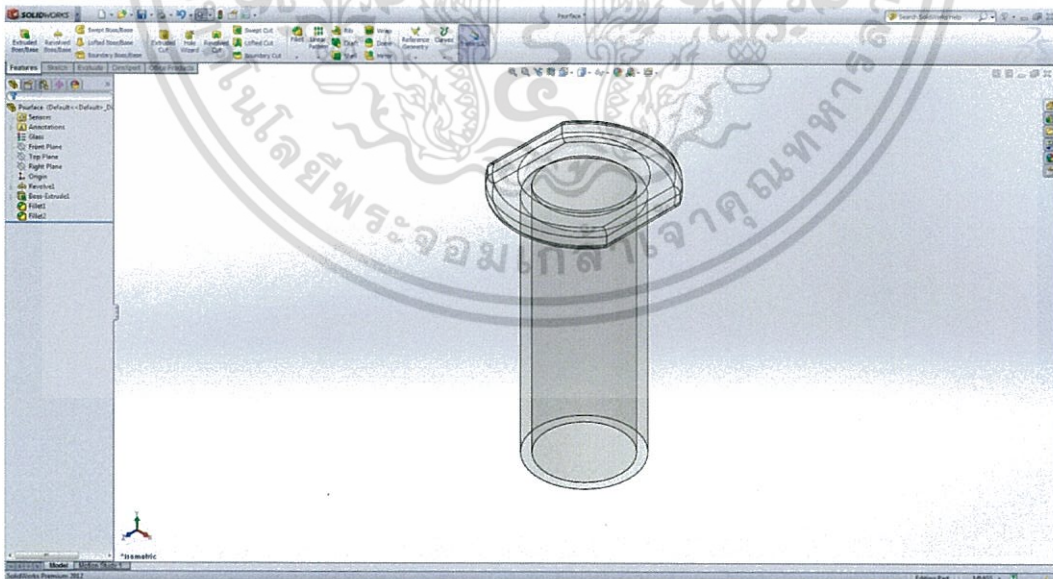
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้คำสั่ง “Extruded Boss/Base” รูป 3 มิติ โดยกำหนดความยาวของชิ้นงานเป็น “3.5 mm”



รูปที่ 3.49 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (41)

5. ใช้คำสั่ง “Fillet” เป็นระยะรัศมี “2 mm” ที่ขอบรูด้านบนและ “1 mm” ที่บริเวณขอบของด้านบนชิ้นงาน จะได้ชิ้นงานดังรูป

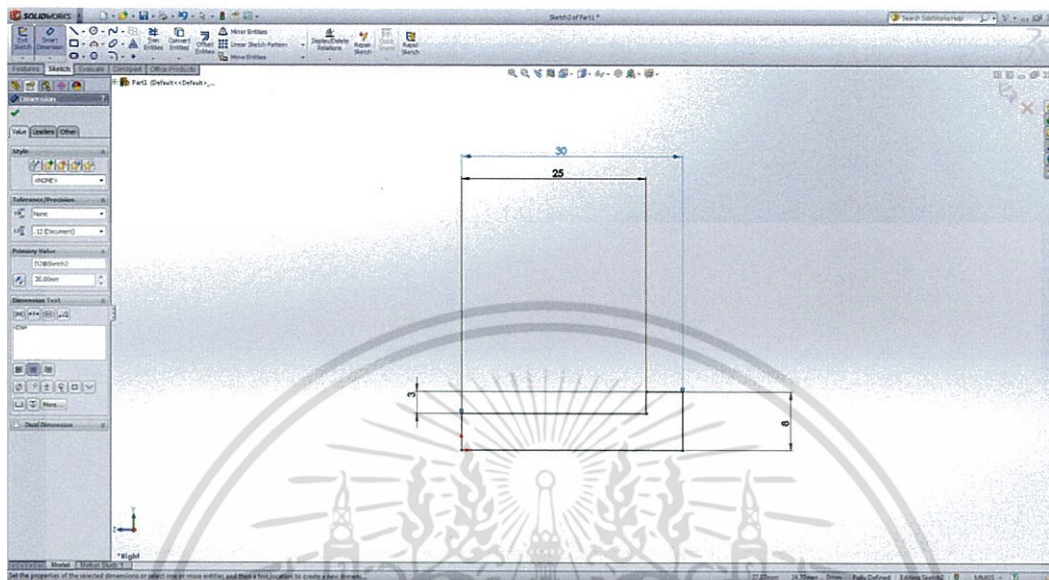


รูปที่ 3.50 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (42)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

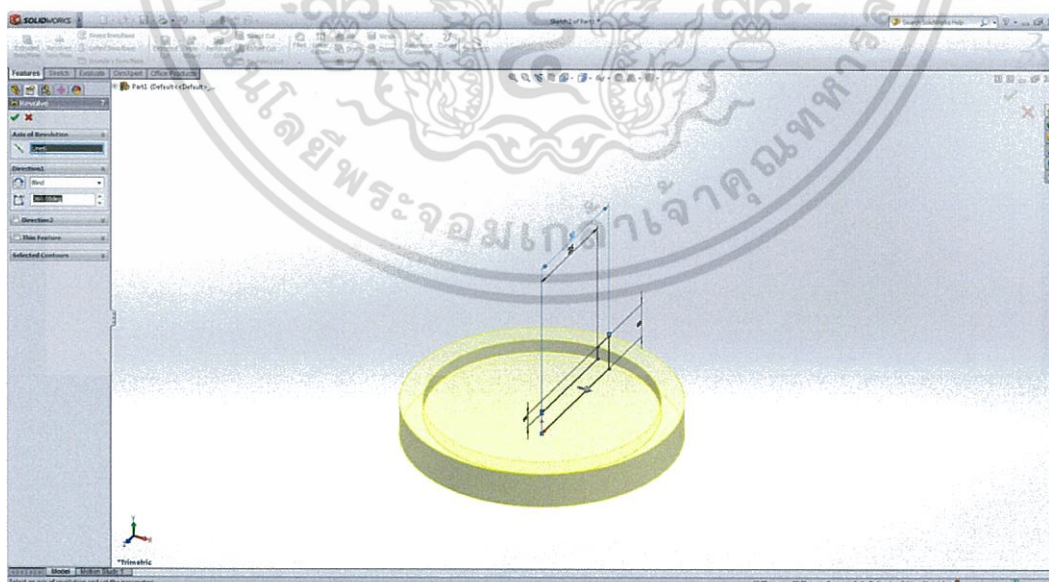
- บุขกระบอกสูบกำลัง

1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “Cast stainless steel” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกล



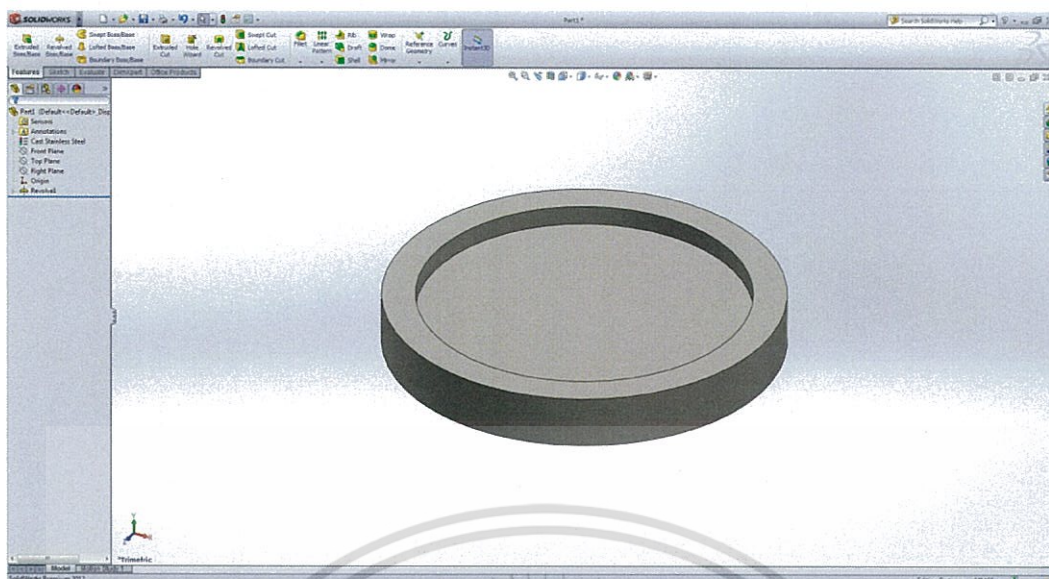
รูปที่ 3.51 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (43)

2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base” ในการขึ้นรูปสามมิติจะได้ชิ้นงานดังรูป



รูปที่ 3.52 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (44)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.53 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (45)

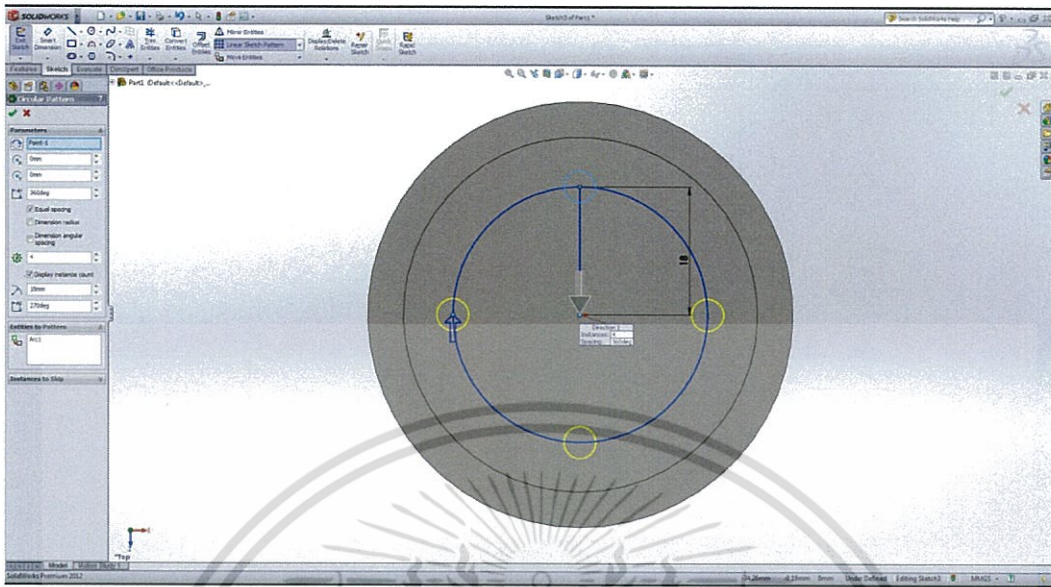
3. เลือก “Bottom view” แล้ววาดรูปวงกลมโดยใช้คำสั่ง “Circle” และกำหนดขนาดดังรูปที่ 3.49



รูปที่ 3.54 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (46)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้คำสั่ง “Circular pattern” ในการวาดวงกลมที่เหลือดังรูป



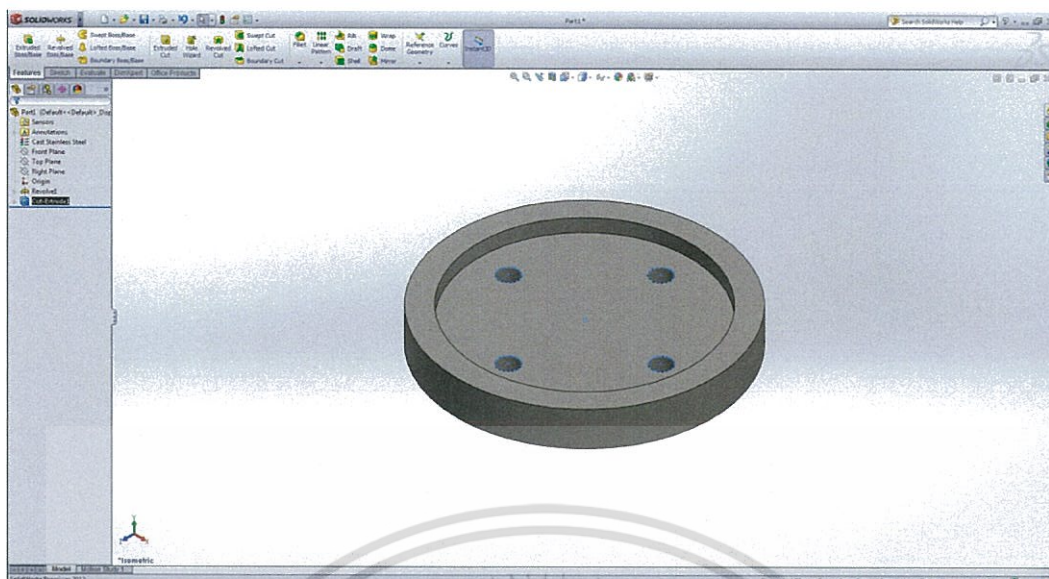
รูปที่ 3.55 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (47)

5. ใช้คำสั่ง “Extrude cut” โดยตัดแบบ “Up to next” จะได้ชิ้นงานดังรูป



รูปที่ 3.56 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (48)

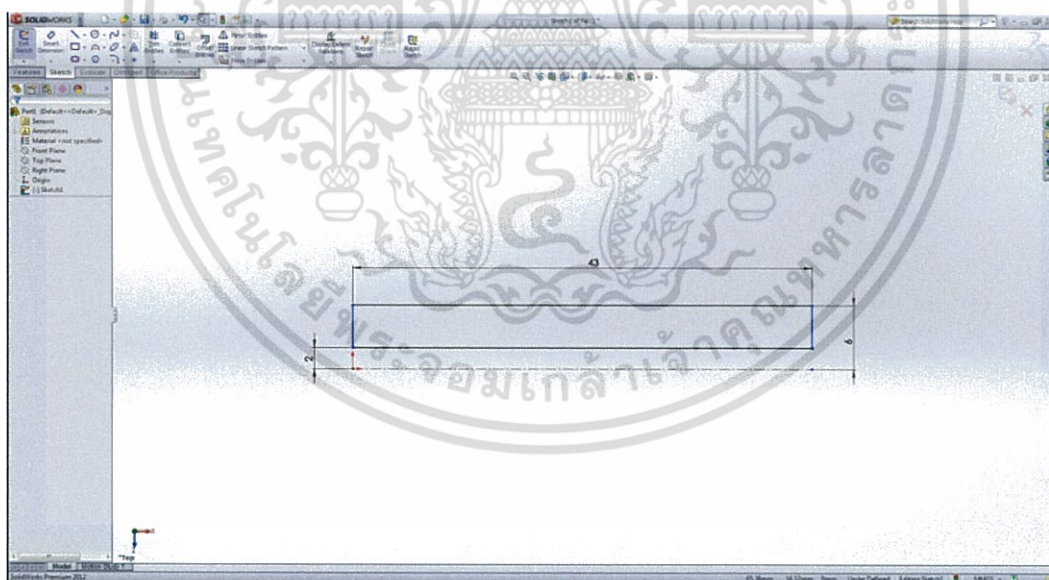
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.57 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (49)

3.2.3 ท่ออากาศ

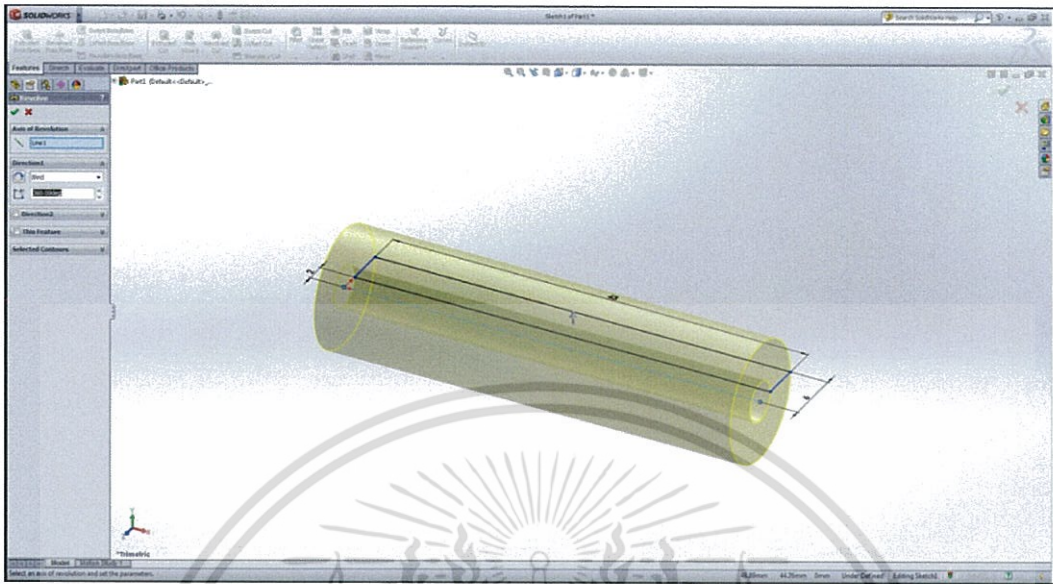
- 1.เลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลตงรูป



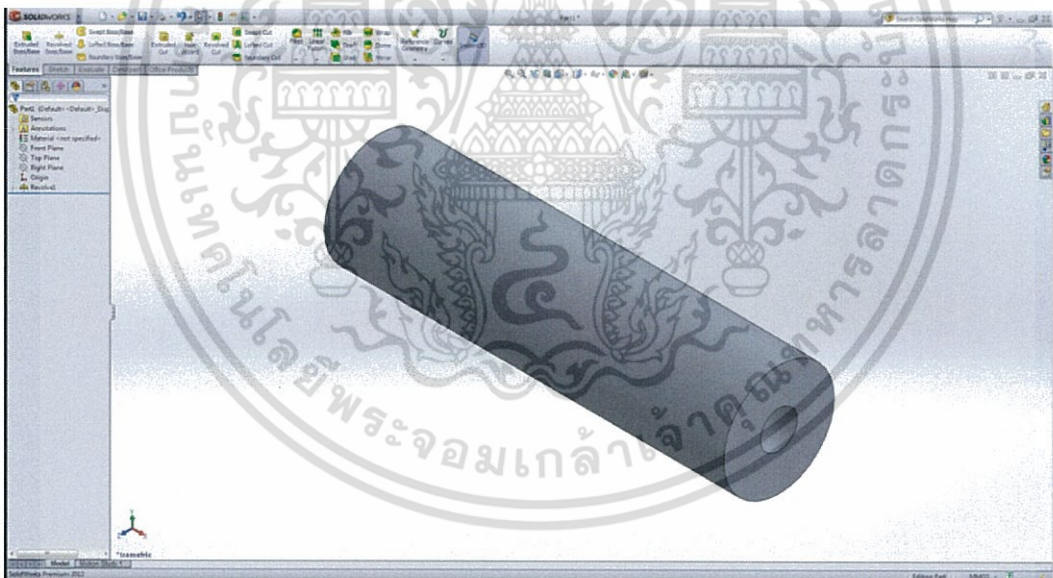
รูปที่ 3.58 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (50)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base” ในการขึ้นรูปสามมิติ จะได้ชิ้นงานดังรูป



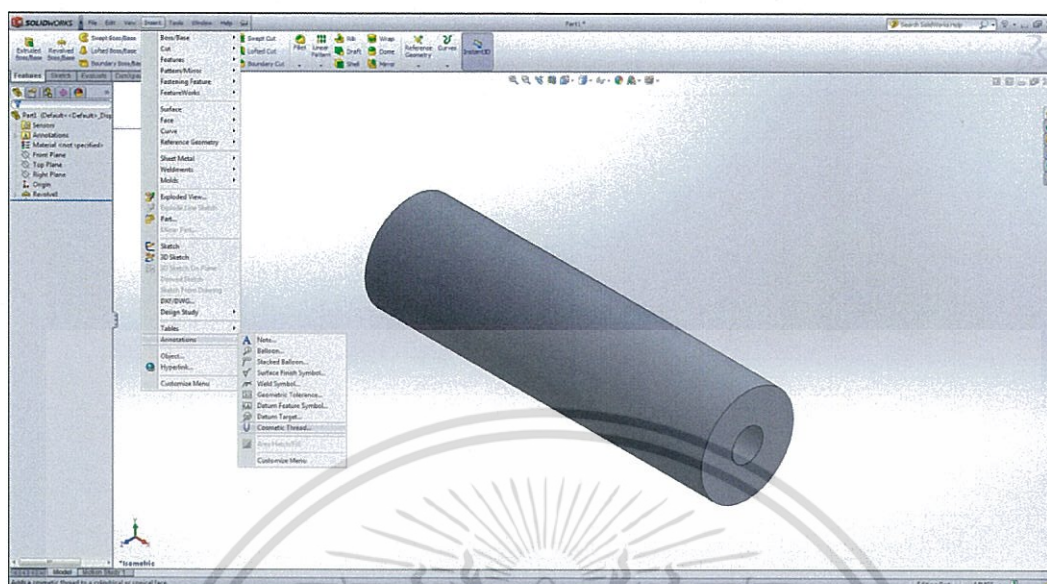
รูปที่ 3.59 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (51)



รูปที่ 3.60 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (52)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สร้างเกลียวโดยไปที่ “Insert” เลือก “Annotations” เลือก “Cosmetic Threads”



รูปที่ 3.61 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (53)

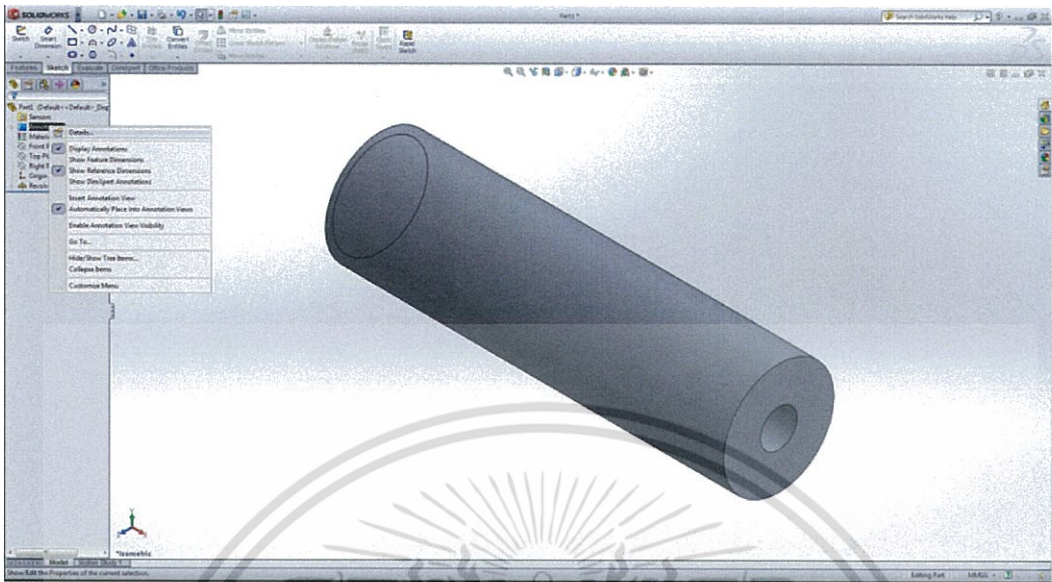
4. เลือกพื้นที่ “Edge<2>” ของชิ้นงาน กำหนด Standards เป็น “ANSI Metric” กำหนดเป็นเกลียว “M12x1.5” โดยกำหนดความยาวของเกลียวเป็น “Through” ตั้งรูป



รูปที่ 3.62 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (54)

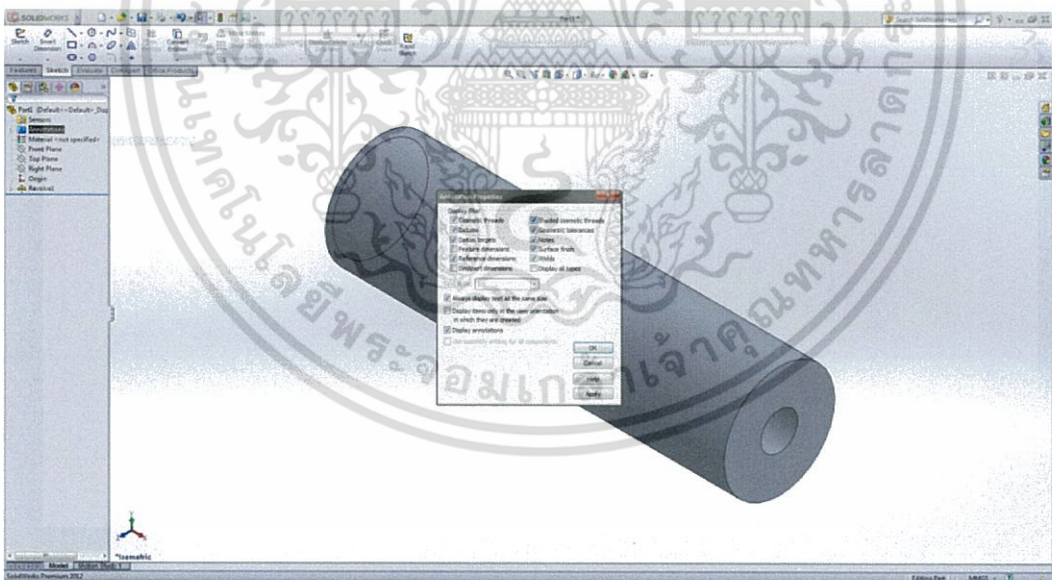
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เข้าไปตั้งค่าแสดงเกลียวโดยคลิกขวาที่ “Annotations” เลือก”Detail”



รูปที่ 3.63 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (55)

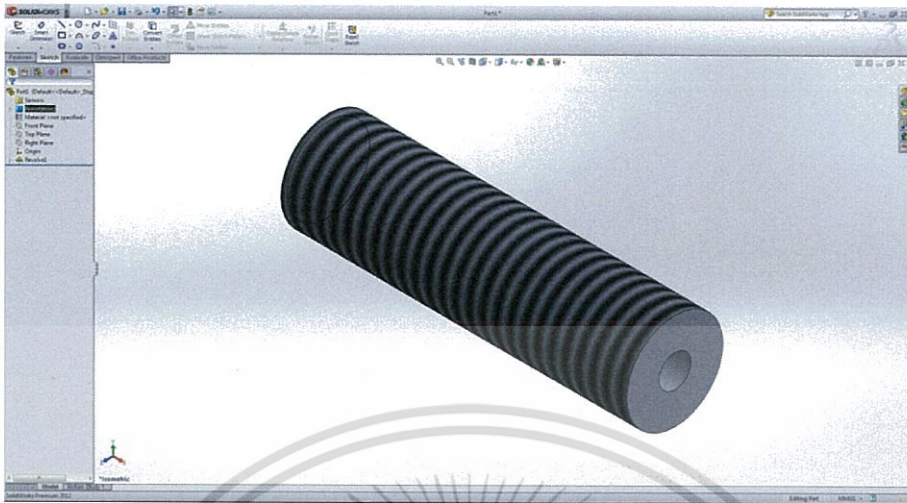
6. จะมีหน้าต่างปรากฏขึ้นให้คลิกเลือกที่ Shade cosmetic threads” จากนั้นกด OK



รูปที่ 3.64 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (56)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จะได้ชิ้นงานท่ออากาศที่มีเกลียวปรากฏดังรูปที่ 3.64



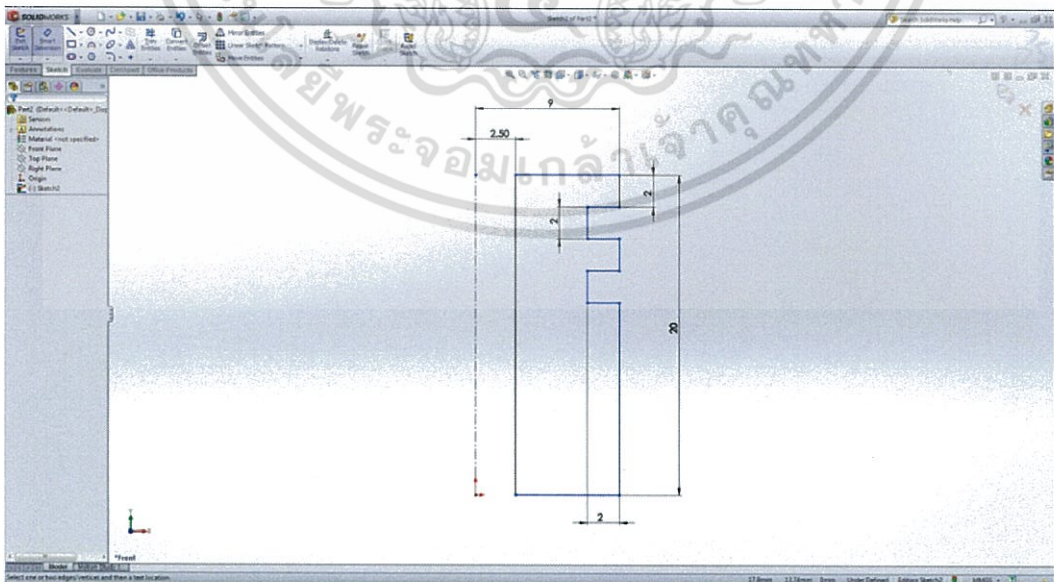
รูปที่ 3.65 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (57)

3.2.4 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์

ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อยทั้งหมด 4 ส่วนด้วยกัน ประกอบด้วย แกนยึดลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ แกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ และตัวเชื่อมต่อเหียง

- แกนยึดลูกสูบดิสเพลสเซอร์

1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “1060 Aluminium alloy” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.65

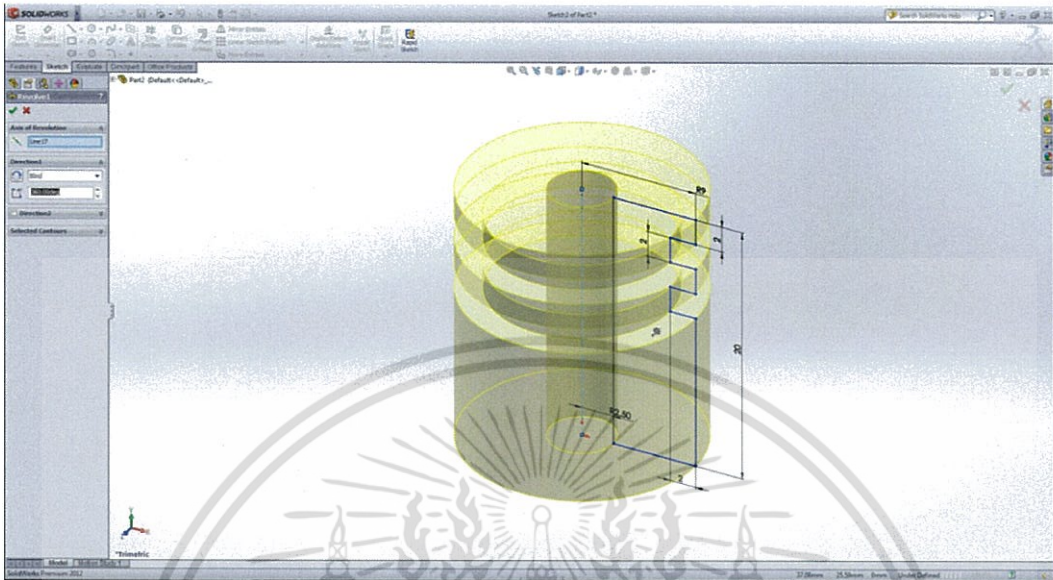


รูปที่ 3.66 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (58)

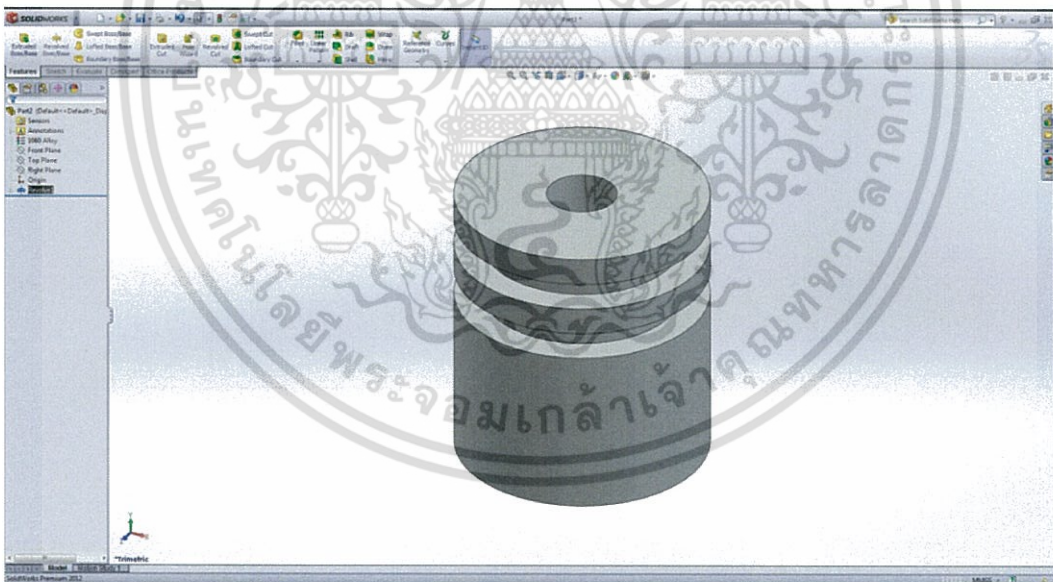
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base”  ในการขึ้นรูปสามมิติ จะได้ชิ้นงานดังรูปที่

3.67



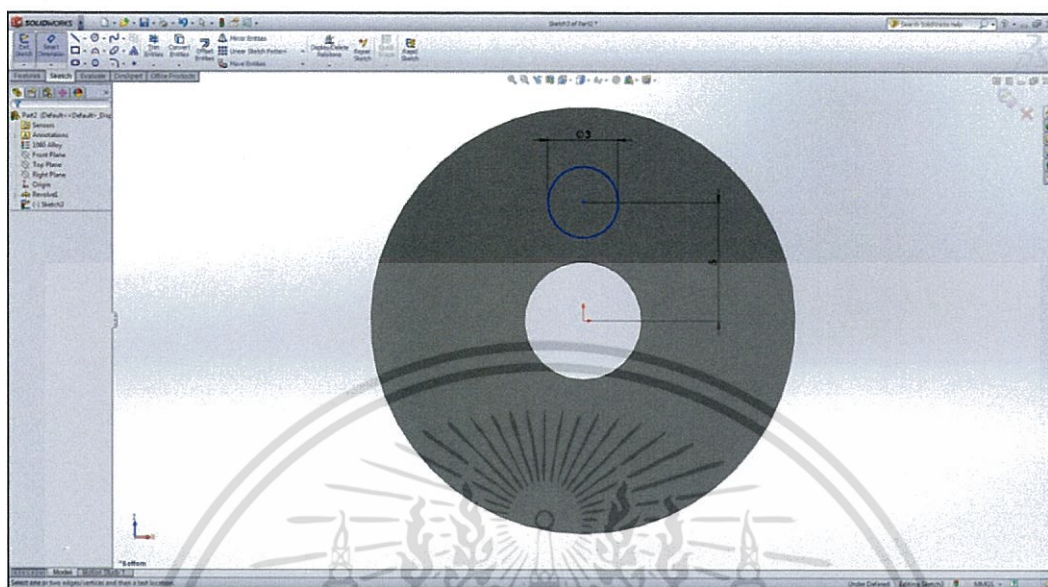
รูปที่ 3.67 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (59)



รูปที่ 3.68 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (60)

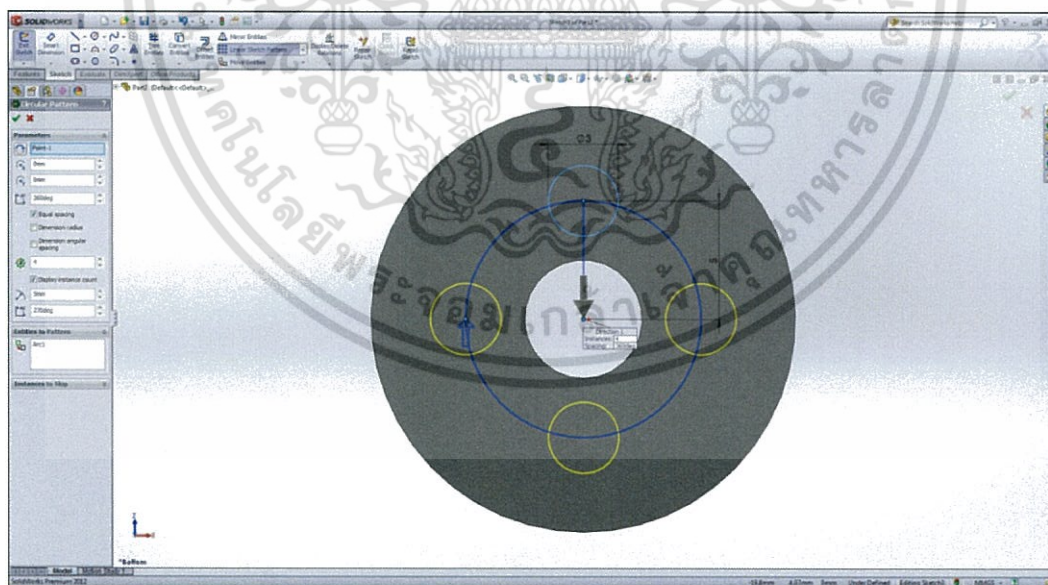
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือก “Bottom view” แล้ววาดรูปวงกลมโดยใช้คำสั่ง “Circle”  และกำหนดขนาดดังรูป



รูปที่ 3.69 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (61)

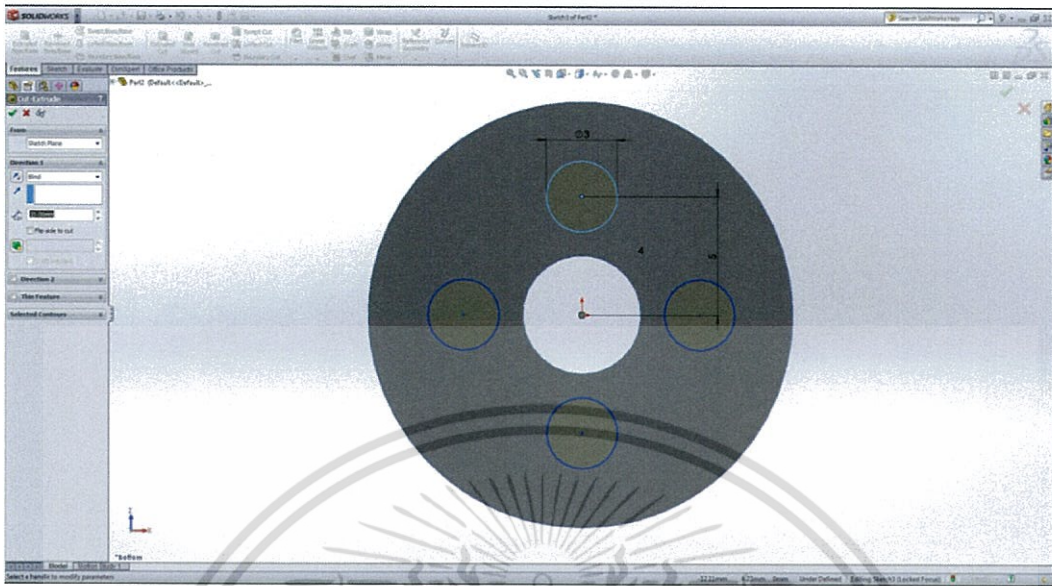
4. ใช้คำสั่ง “Circular pattern” ในการวาดวงกลมที่เหลือดังรูปที่ 3.69



รูปที่ 3.70 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (62)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้คำสั่ง “Extrude cut” โดยตัดแบบ “Up to next” จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.71



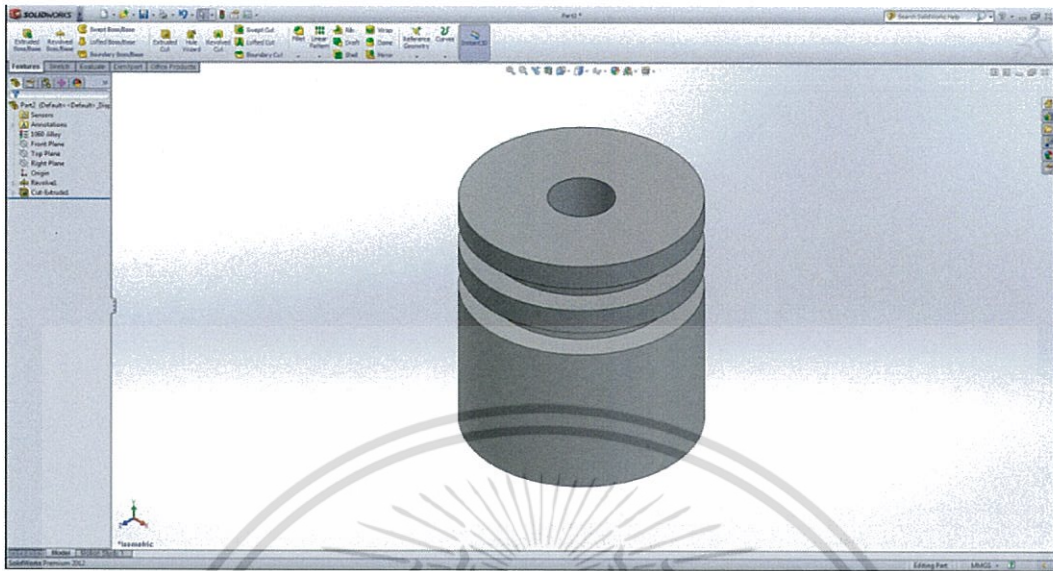
รูปที่ 3.71 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (63)



รูปที่ 3.72 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (64)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

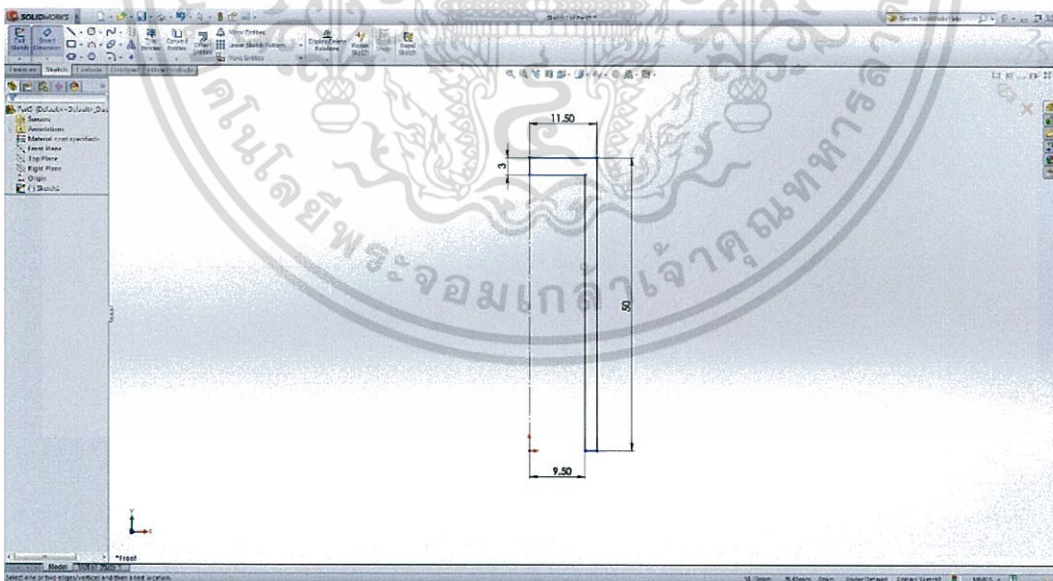
6. ได้ชิ้นงานแกนยึดลูกสูบดังรูปที่ 3.73



รูปที่ 3.73 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (65)

- ลูกสูบดิสเพลสเซอร์

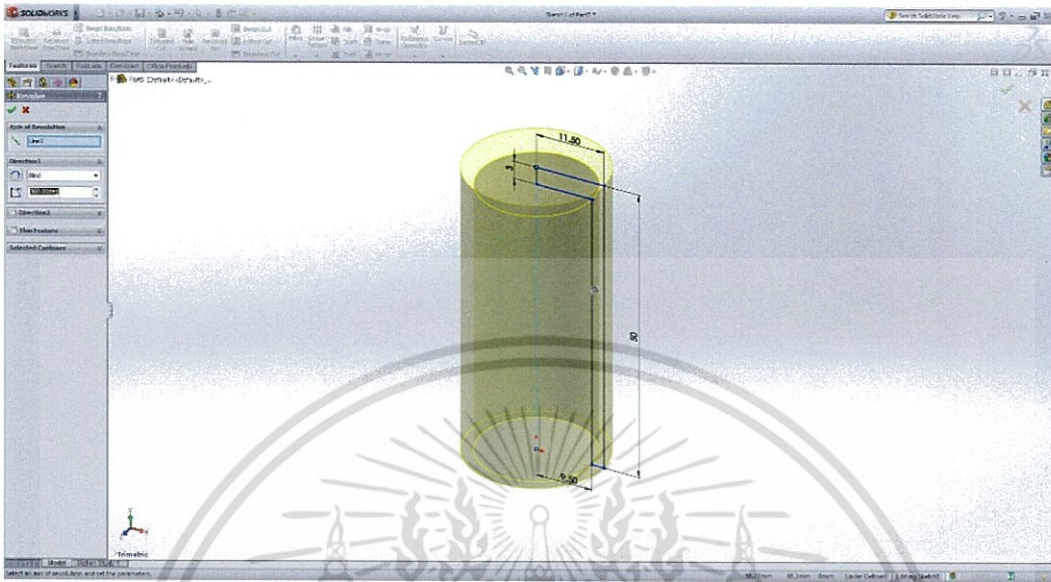
1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “Glass” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลตังรูป



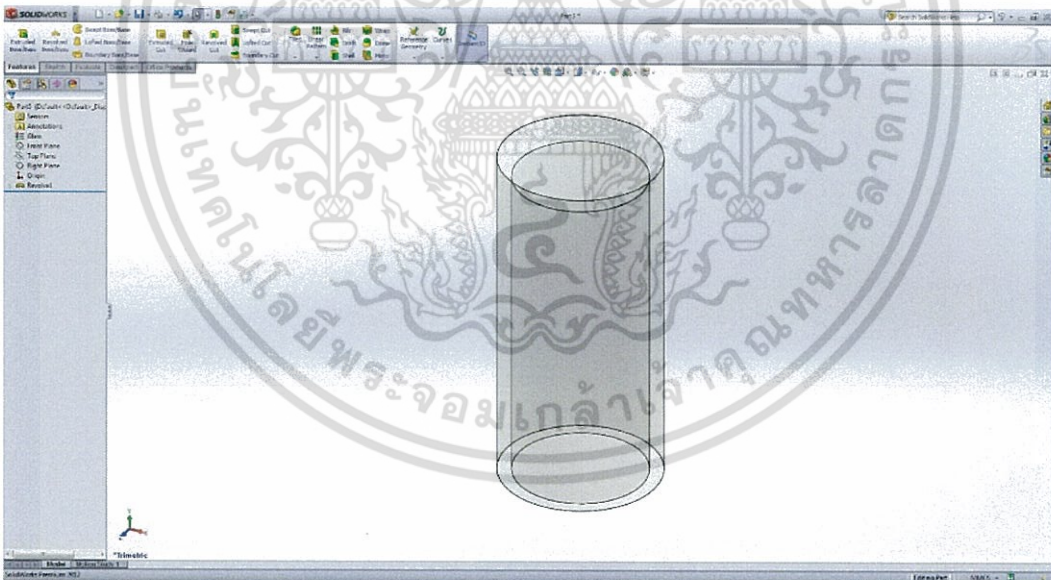
รูปที่ 3.74 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (66)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base”  ในการขึ้นรูปสามมิติ จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.76



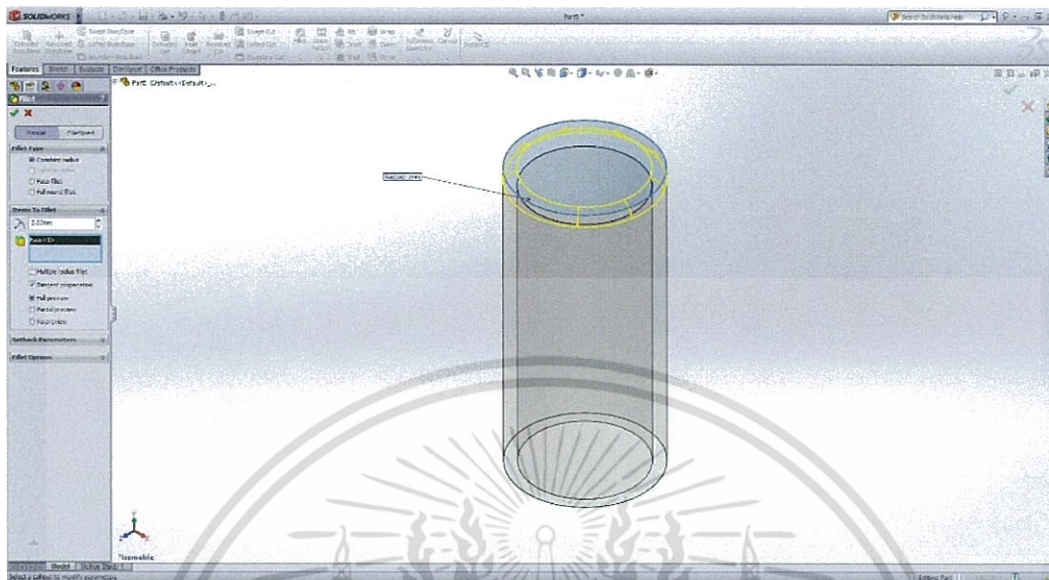
รูปที่ 3.75 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (67)



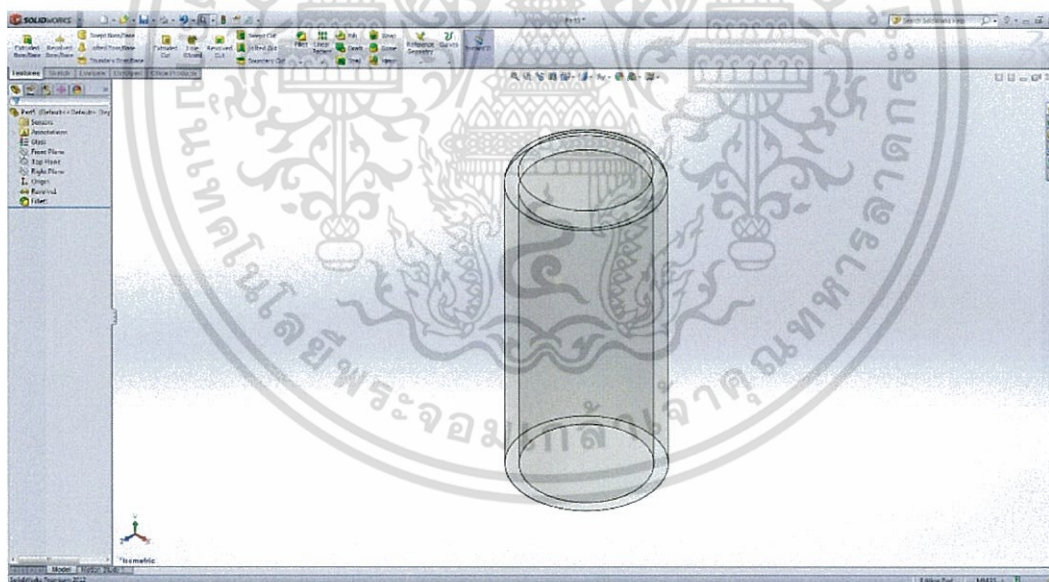
รูปที่ 3.76 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (68)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือก “Fillet” เลือกพื้นที่ “Face 1” และกำหนดรัศมี “2.00 mm” จะได้ชิ้นงาน ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ดังรูป



รูปที่ 3.77 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (69)

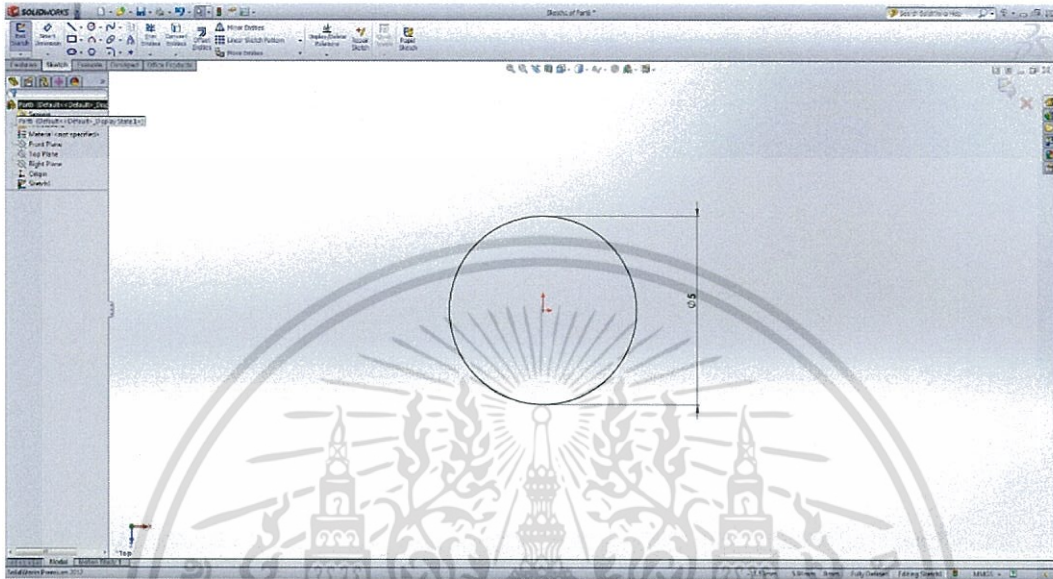


รูปที่ 3.78 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (70)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์

1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “Cast stainless steel” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Top plane แล้วใช้คำสั่ง “Circle” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.79



รูปที่ 3.79 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (71)

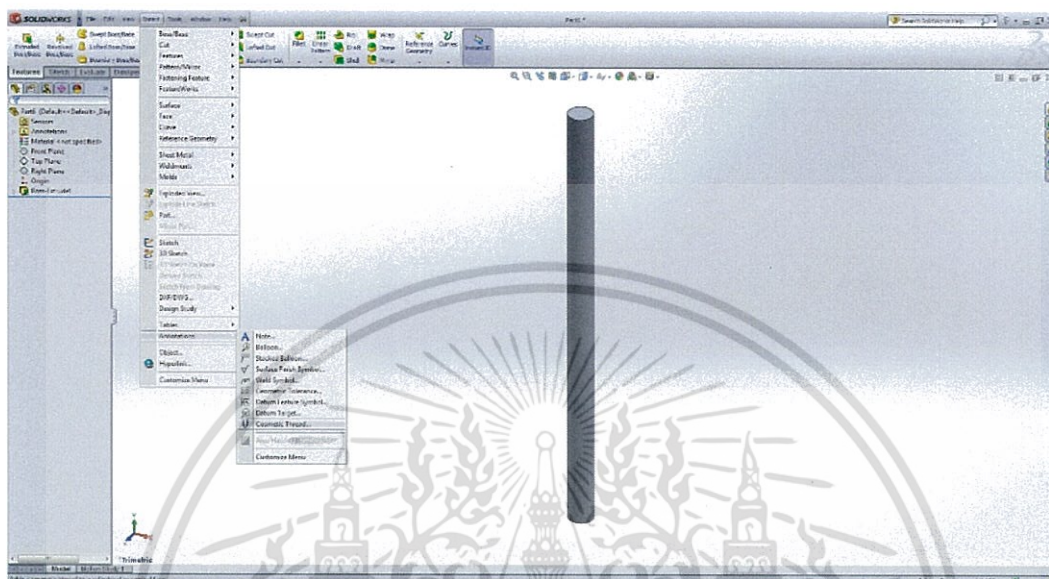
2. ใช้คำสั่ง “Extruded Boss/Base” ขึ้นรูป 3 มิติ โดยกำหนดความยาวของชิ้นงานเป็น “88.5 mm”



รูปที่ 3.80 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (72)

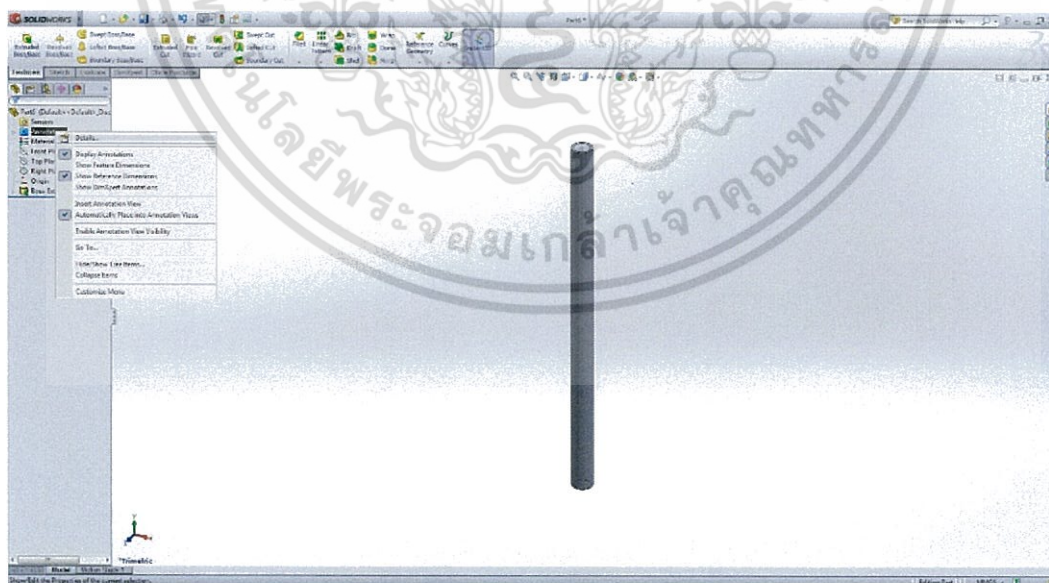
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สร้างเกลียวโดยไปที่ “Insert” เลือก “Annotations” เลือก “Cosmetic Threads” จากนั้นเลือกพื้นที่ “Edge<1>” และ “Edge<2>” ของชิ้นงาน กำหนด Standards เป็น “ANSI Metric” กำหนดเป็นเกลียว “M5x0.8” โดยกำหนดความยาวของเกลียวเป็น “7 mm” ดังรูปที่ 3.81



รูปที่ 3.81 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (73)

4. เข้าไปตั้งค่าแสดงเกลียวโดยคลิกขวาที่ “Annotations” เลือก “Detail”

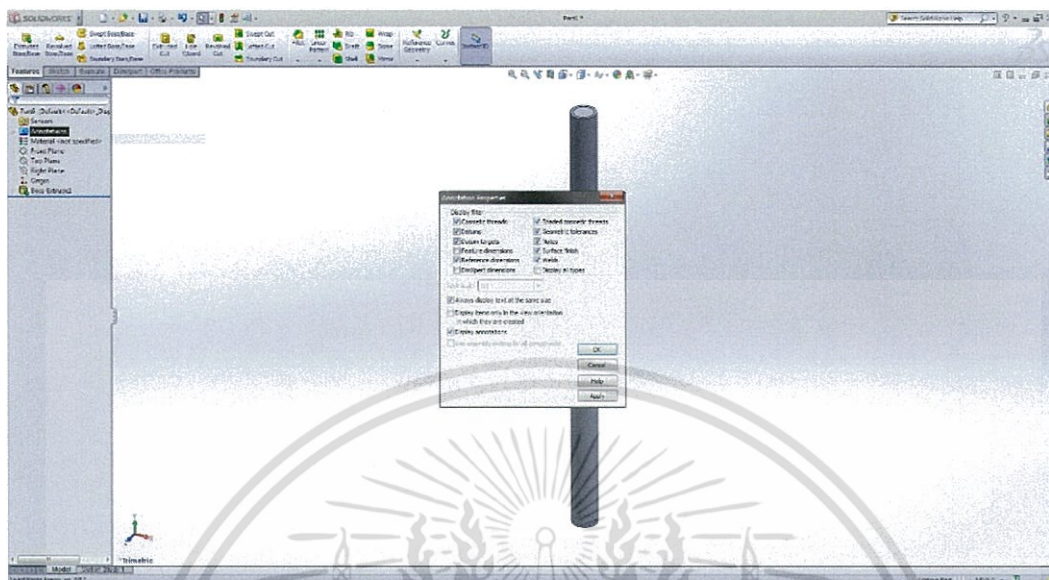


รูปที่ 3.82 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (74)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จะมีหน้าต่างปรากฏขึ้นให้คลิกเลือกที่ "Shade cosmetic threads" จากนั้นกด

OK



รูปที่ 3.83 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (75)

6. ได้ชิ้นงานแกนลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์ตั้งรูป

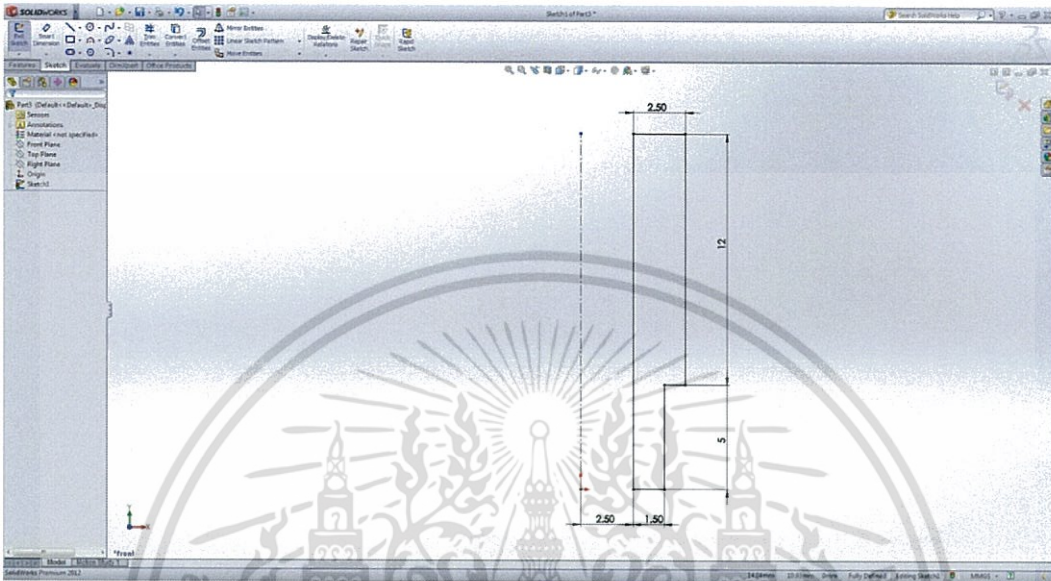


รูปที่ 3.84 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (76)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

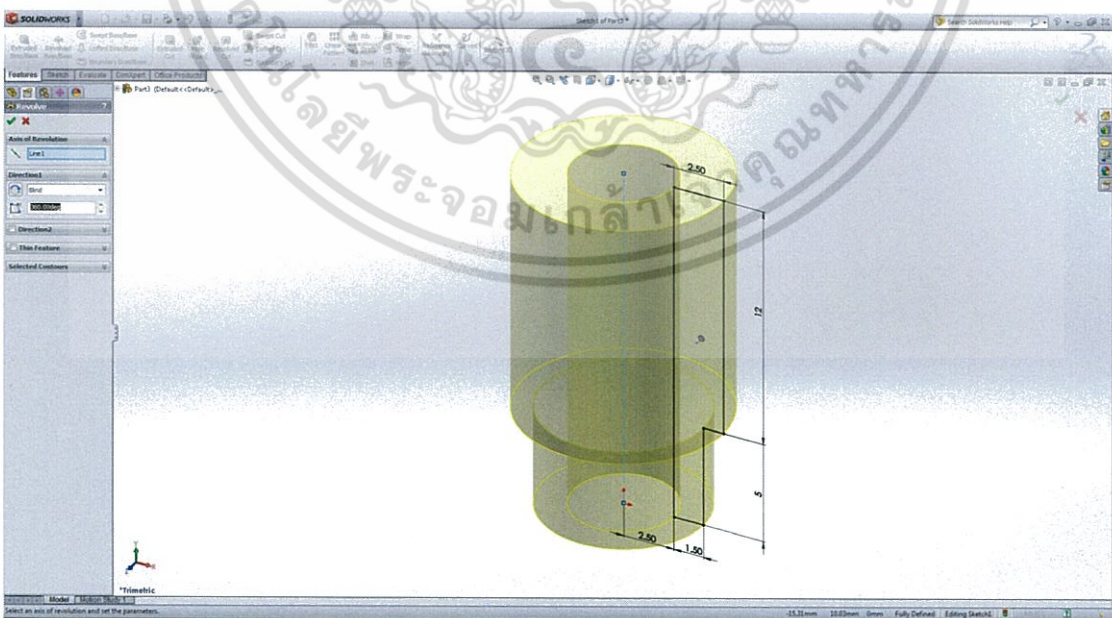
- ตัวเชื่อมต่อเหวี่ยง

1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “Cast stainless steel” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.85




รูปที่ 3.85 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (77)

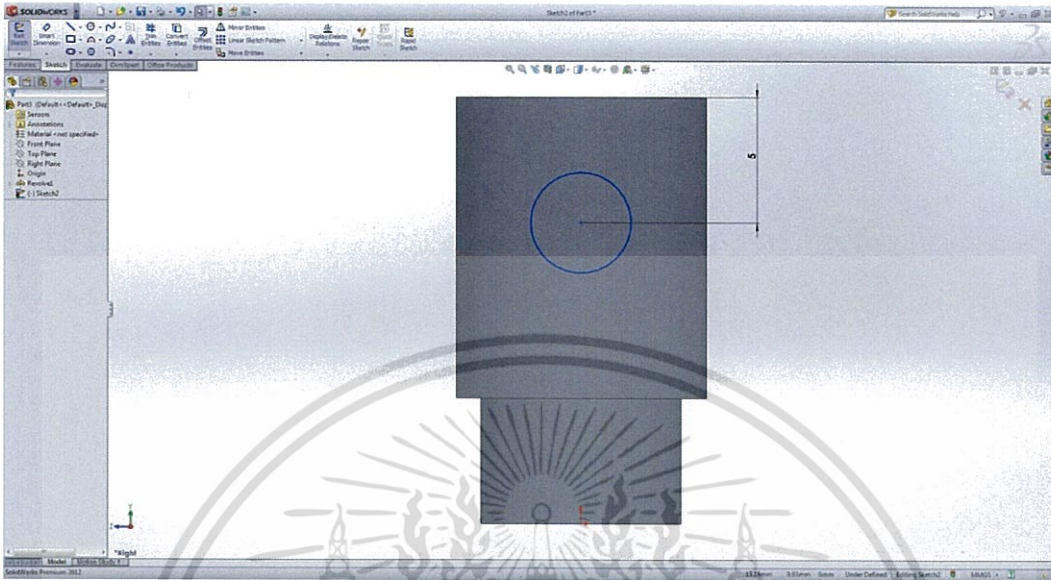
2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base” ในการขึ้นรูปสามมิติ



รูปที่ 3.86 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (78)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วาดรูปวงกลมโดยใช้คำสั่ง “Circle”  ลงบน “Right plane” และกำหนดขนาดดังรูปที่ 3.87



รูปที่ 3.87 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (79)

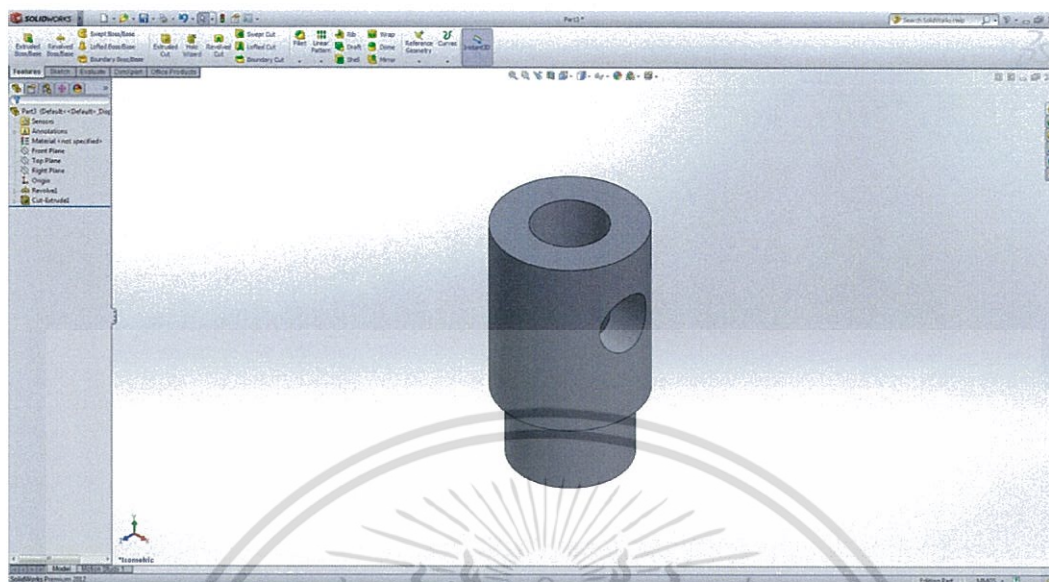
4. ใช้คำสั่ง “Extruded cut” โดยตัดแบบ “Through all” ทั้ง Direction 1 และ Direction 2



รูปที่ 3.88 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (80)

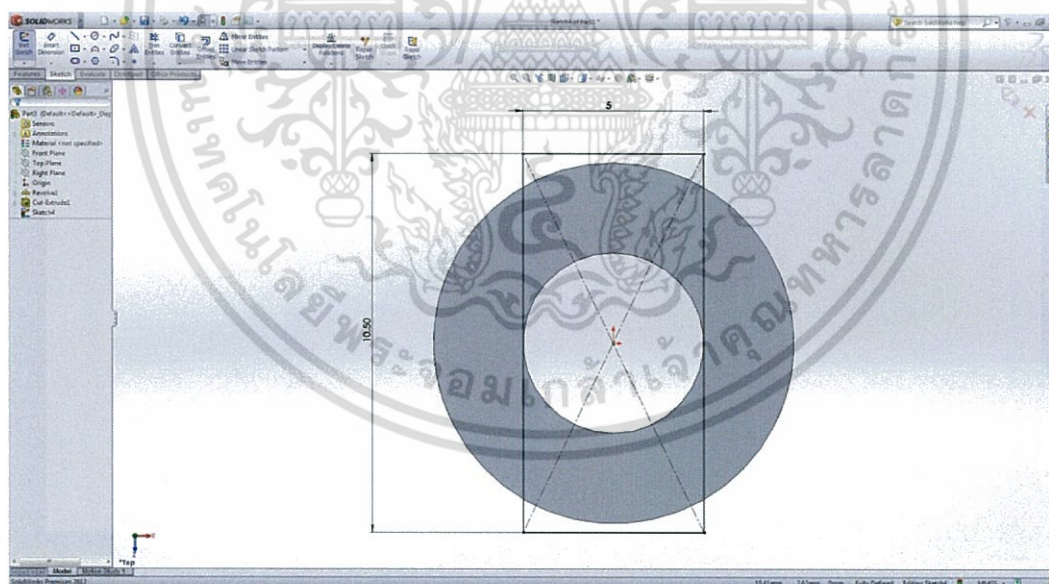
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ชิ้นงานจะมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 3.89 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (81)

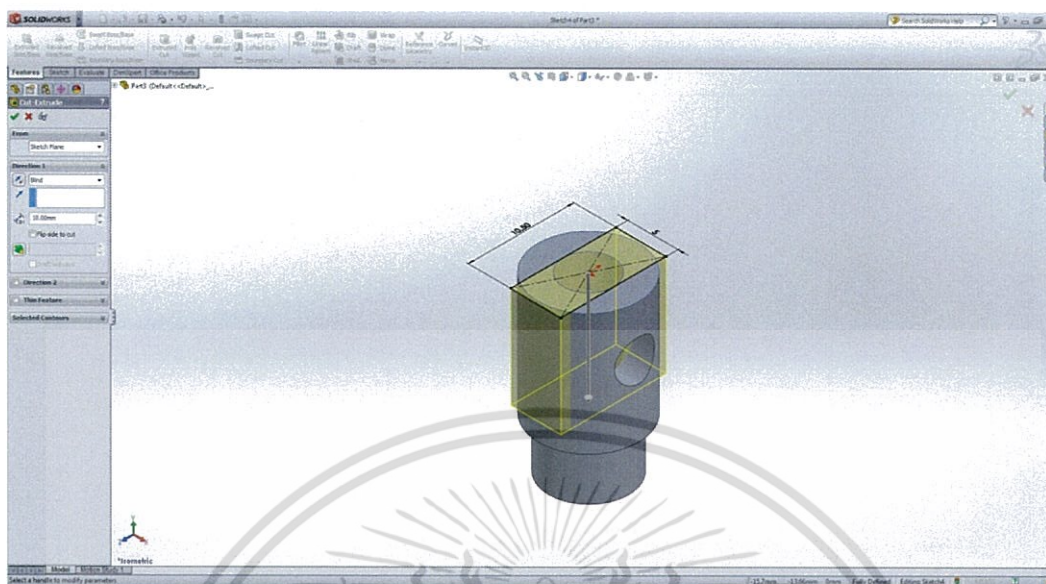
6. ใช้คำสั่ง “Sketch” วาดรูปสี่เหลี่ยมและกำหนดขนาดที่ด้านบนของชิ้นงานดังรูป



รูปที่ 3.90 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (82)

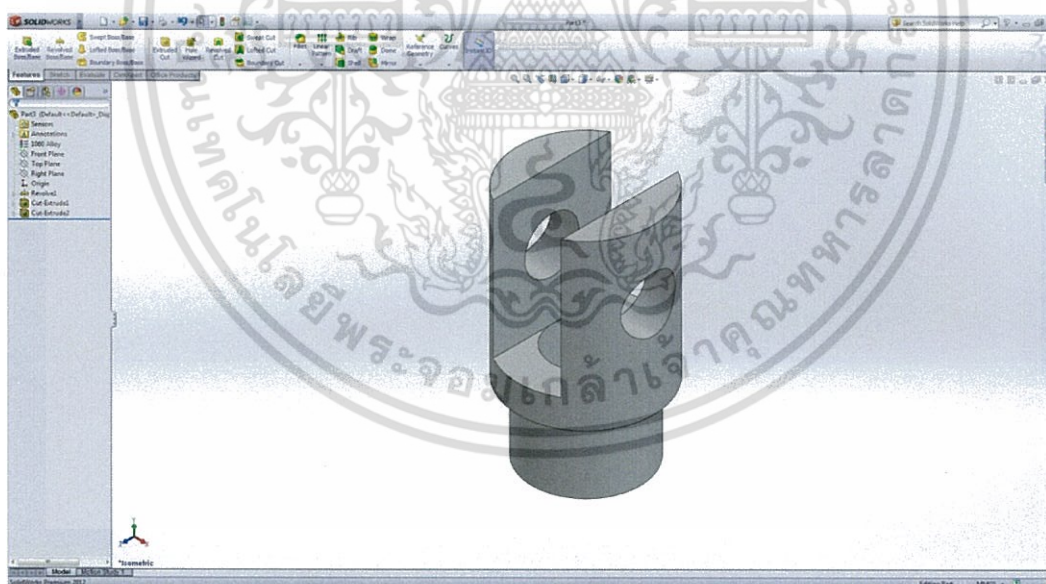
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ใช้คำสั่ง “Extruded cut” โดยตัดแบบ “Blind” ลงไปเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.91 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (83)

8. จะได้ชิ้นงานตัวเชื่อมข้อเหวี่ยงดังรูป



รูปที่ 3.92 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (84)

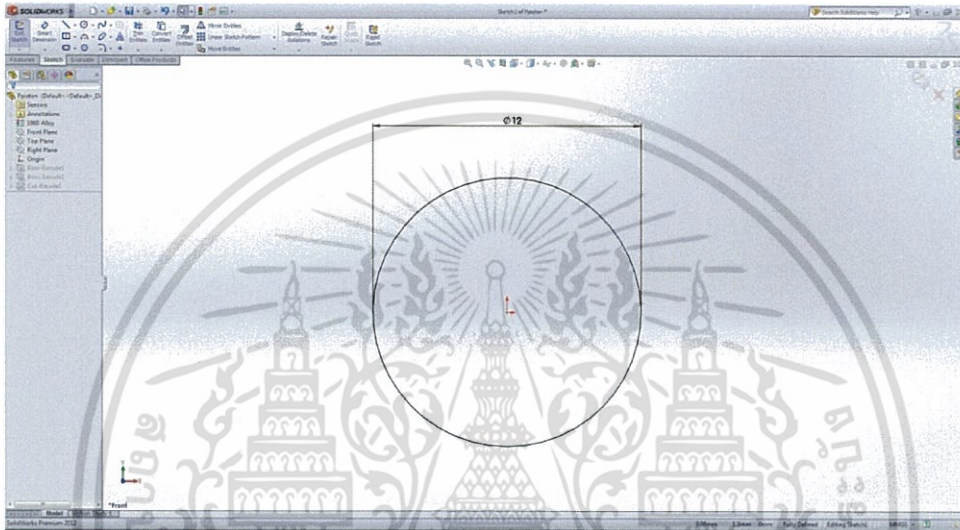
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 ลูกสูบกำลัง

ลูกสูบกำลังประกอบด้วยส่วนย่อยสองส่วนคือ แกนลูกสูบกำลังและลูกสูบกำลัง โดยมีวิธีการสร้างชิ้นงานสามมิติดังนี้

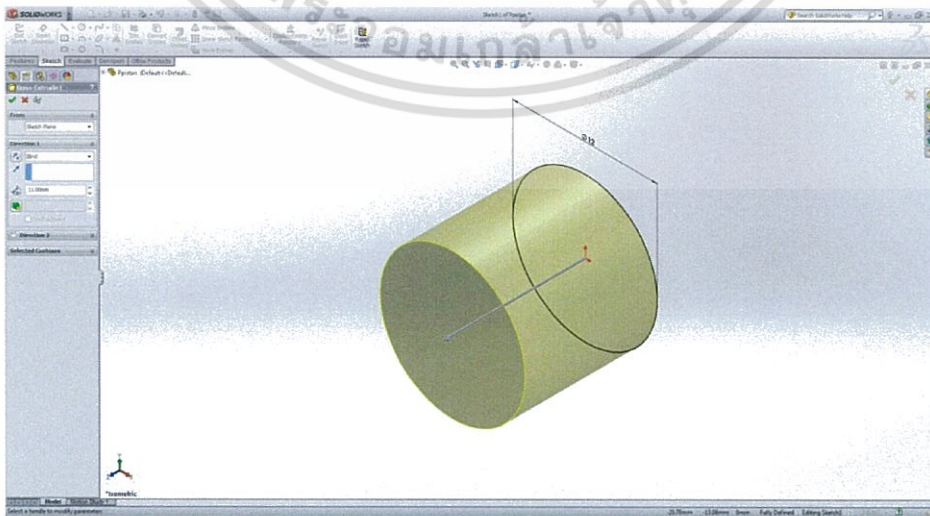
- แกนยึดลูกสูบกำลัง

1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “1060 Aluminium alloy” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Circle” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.93



รูปที่ 3.93 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (85)

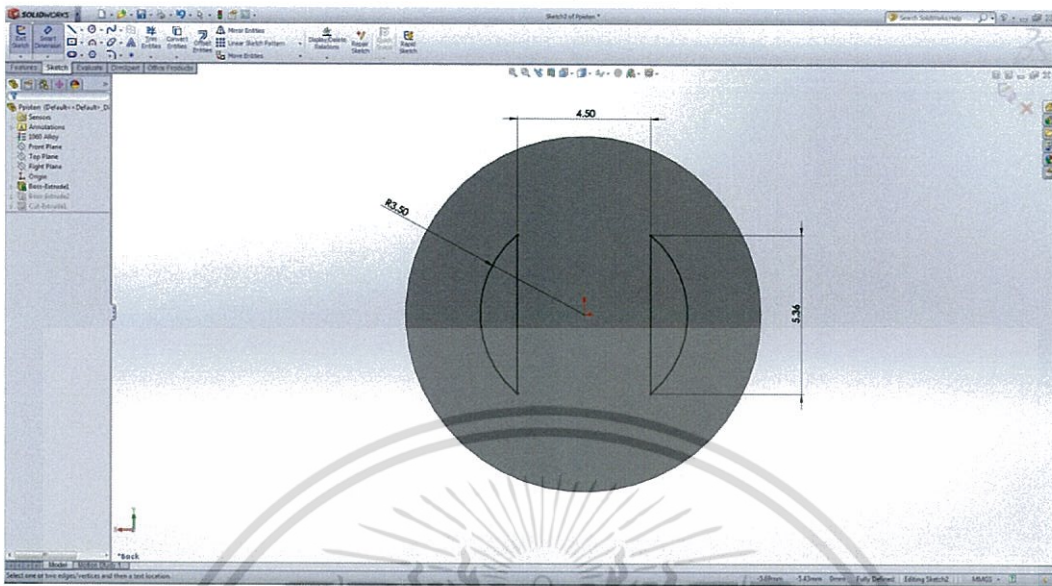
2. ใช้คำสั่ง “Extruded Boss/Base” รูป 3 มิติ โดยกำหนดความยาวของชิ้นงานเป็นระยะ 11 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.94 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (86)

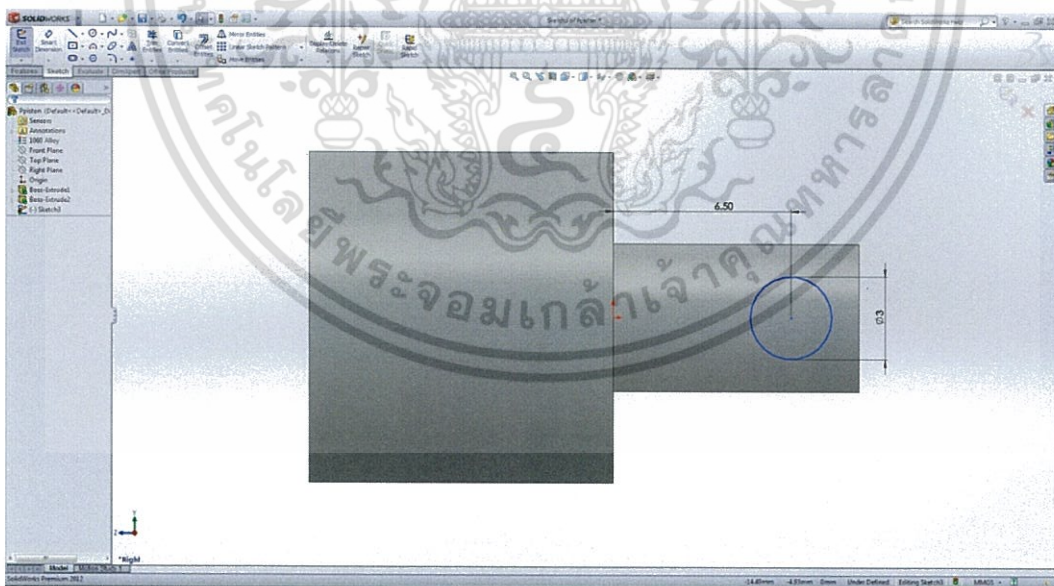
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้คำสั่ง “Sketch” วาดรูปทรงทางด้านหลังของชิ้นงานและกำหนดขนาดดังรูป



รูปที่ 3.95 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (87)

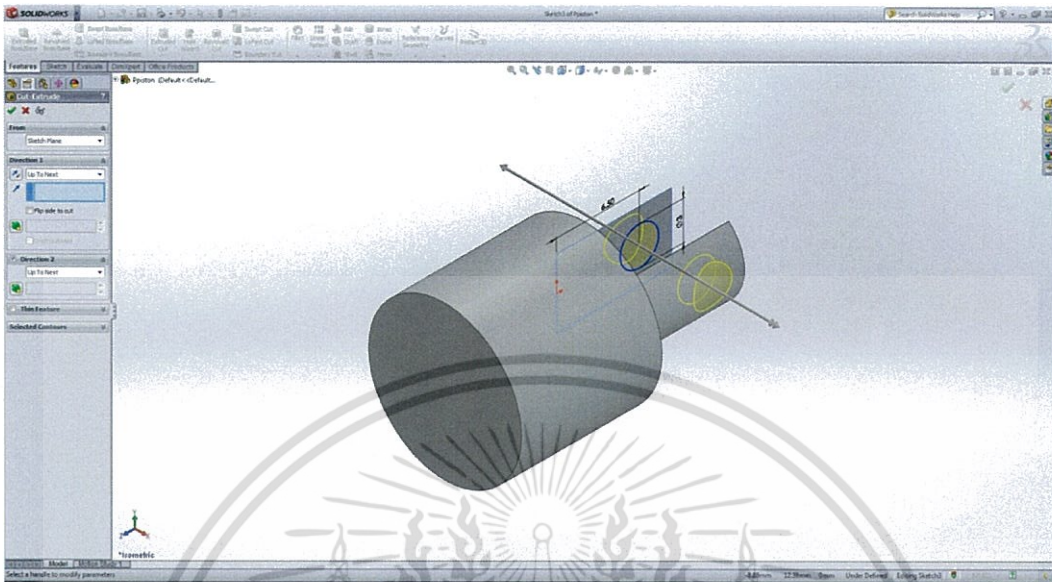
4. ใช้คำสั่ง “Extruded Boss/Base” รูป 3 มิติ โดยกำหนดความยาวของชิ้นงานเป็นระยะ 1 มิลลิเมตร และวาดรูปโดยใช้พื้นผิวเรียบแล้วกำหนดขนาดดังรูป



รูปที่ 3.96 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (88)

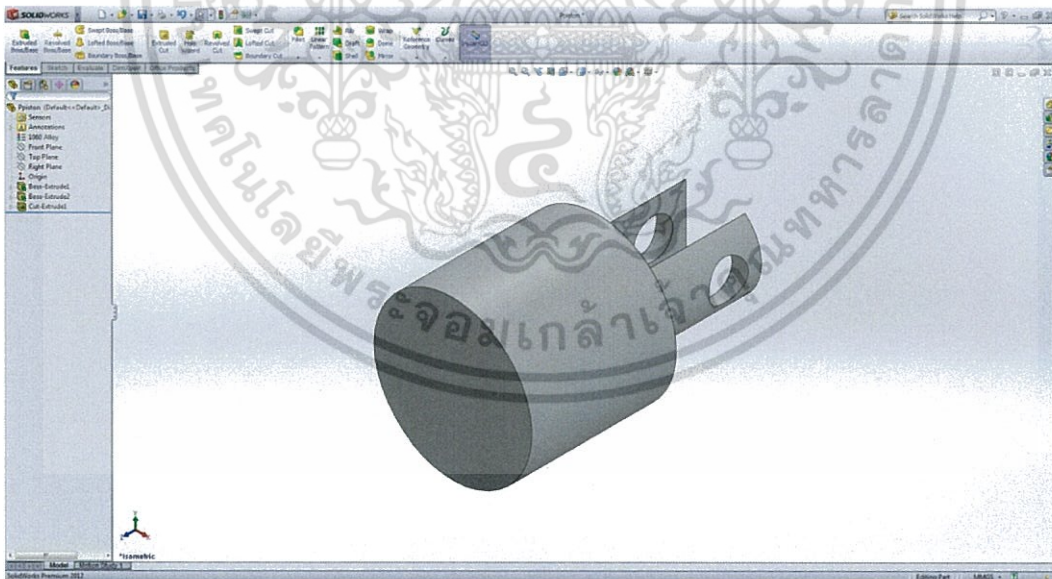
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้คำสั่ง “Extruded cut” โดยตัดแบบ “Up to next” ทั้ง Direction 1 และ Direction 2



รูปที่ 3.97 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (89)

6. จะได้ชิ้นงานแกนลูกสูบกำลังดังรูป

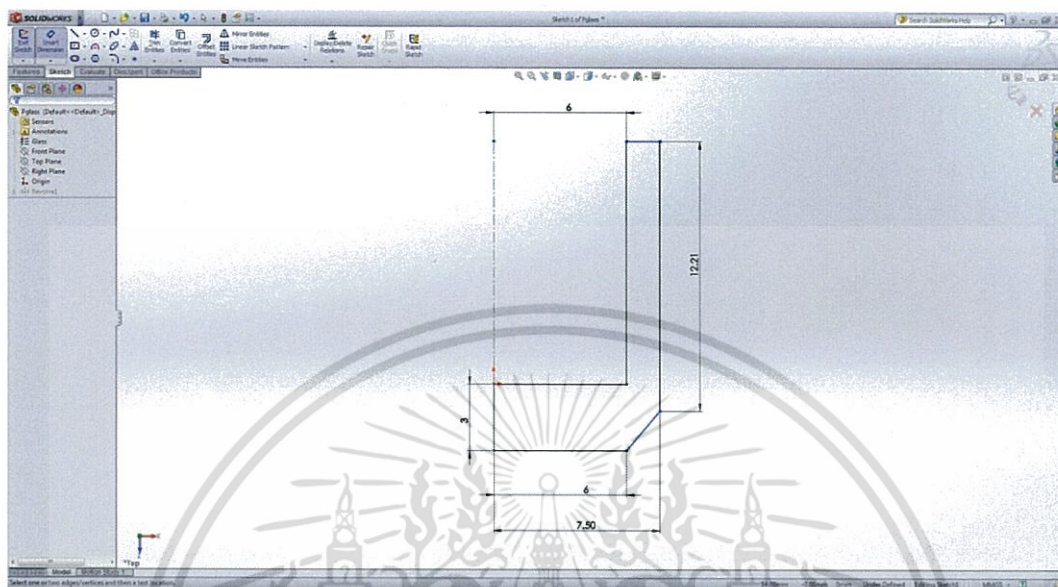


รูปที่ 3.98 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (90)


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

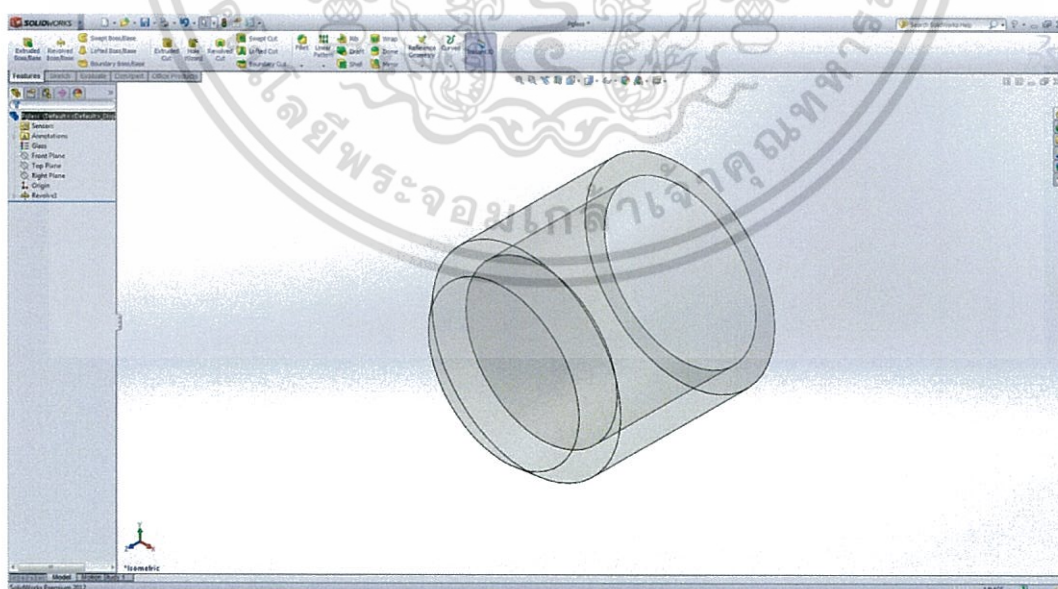
- ลูกสูบกำลัง

1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “Glass” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Top plane แล้วใช้คำสั่ง “Line”  วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.99



รูปที่ 3.99 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (91)

2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base”  ในการขึ้นรูปสามมิติจะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.100



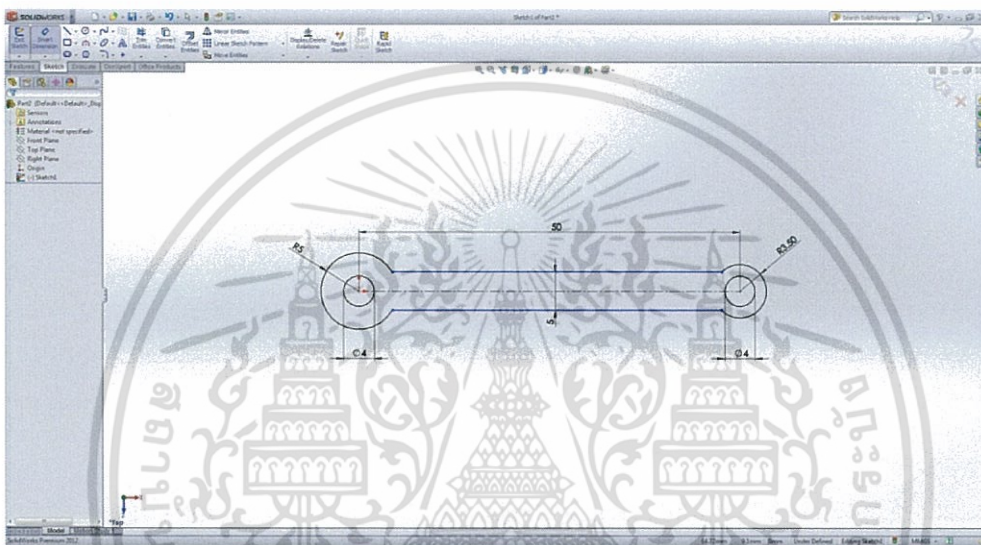
รูปที่ 3.100 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (92)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 ข้อเหวี่ยง

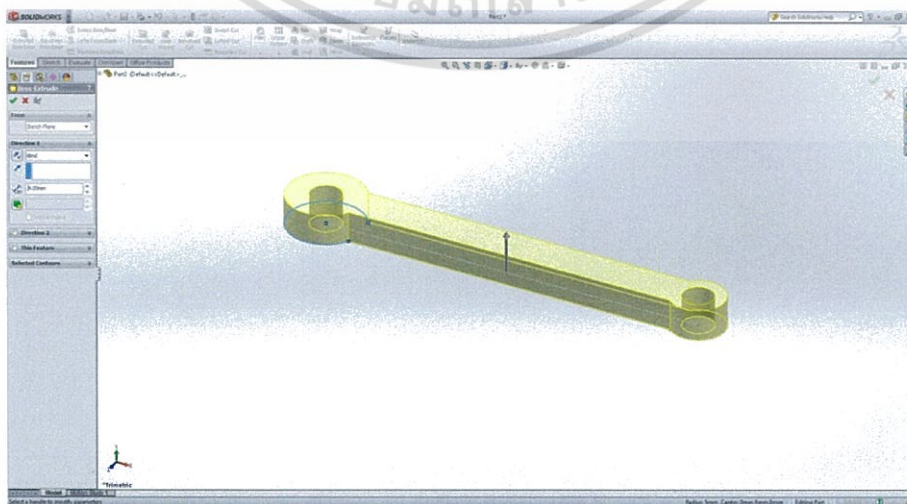
ข้อเหวี่ยงที่ใช้ในเครื่องยนต์จะมีทั้งหมดสองชิ้นแต่จะมีระยะห่างระหว่างรูของข้อเหวี่ยงที่ต่างกัน ข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์มีความระยะห่างระหว่างรูเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และข้อเหวี่ยงกำลังมีระยะห่างระหว่างรูเท่ากับ 50 มิลลิเมตร โดยมีวิธีการสร้างชิ้นงานดังนี้

1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “1060 Aluminium alloy” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Top plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.101



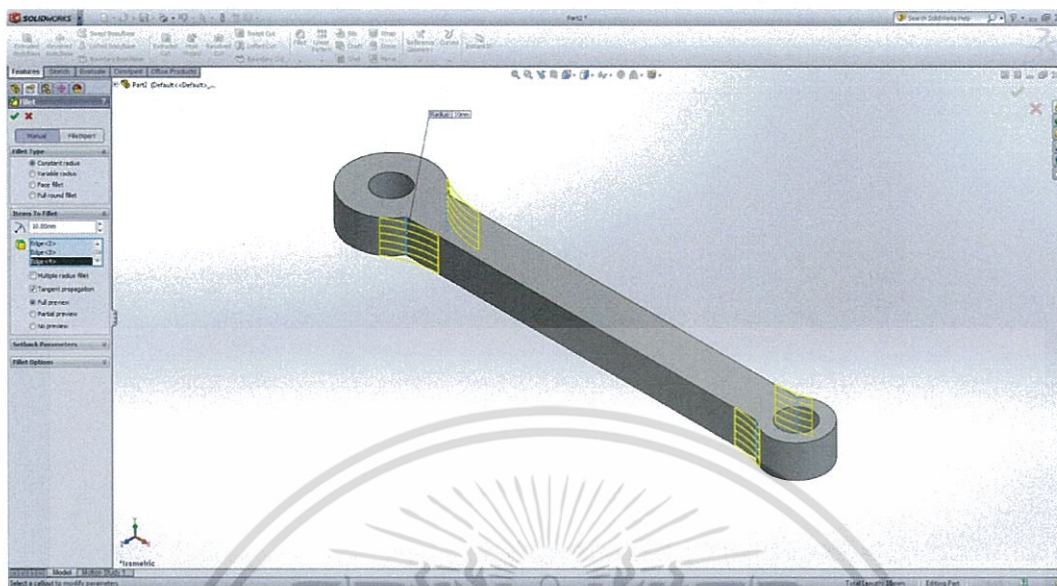
รูปที่ 3.101 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (93)

2. ใช้คำสั่ง “Extruded Boss/Base” รูป 3 มิติ โดยกำหนดความยาวของชิ้นงานเป็นระยะ 4 มิลลิเมตร



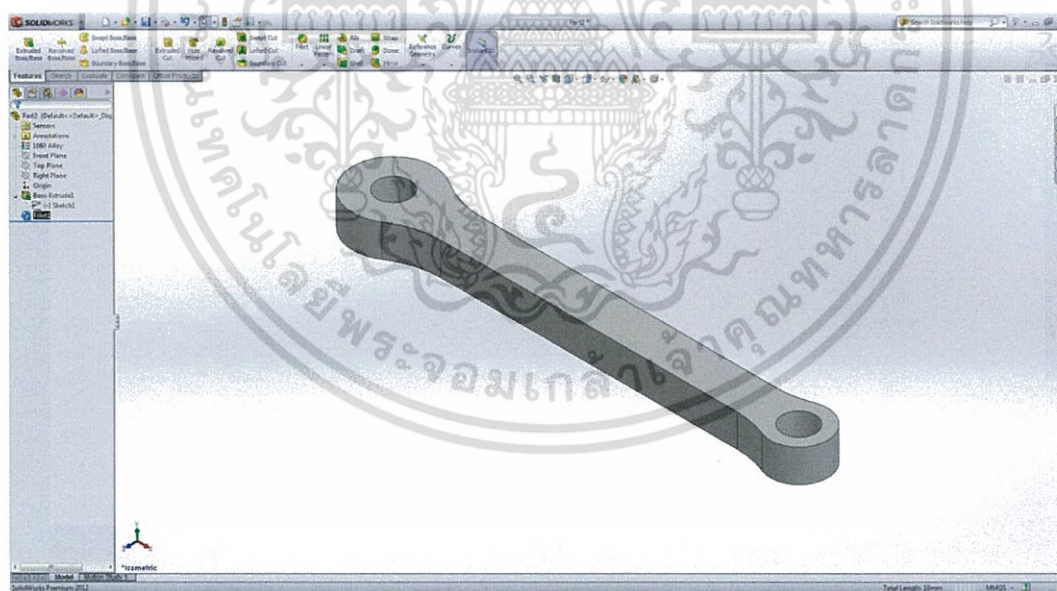
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 3.102 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (94) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้คำสั่ง “Fillet” รัศมี 10 มิลลิเมตรที่บริเวณดังรูป



รูปที่ 3.103 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (95)

4. จะได้ชิ้นงานข้อเหวี่ยงดังรูป



รูปที่ 3.104 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (96)

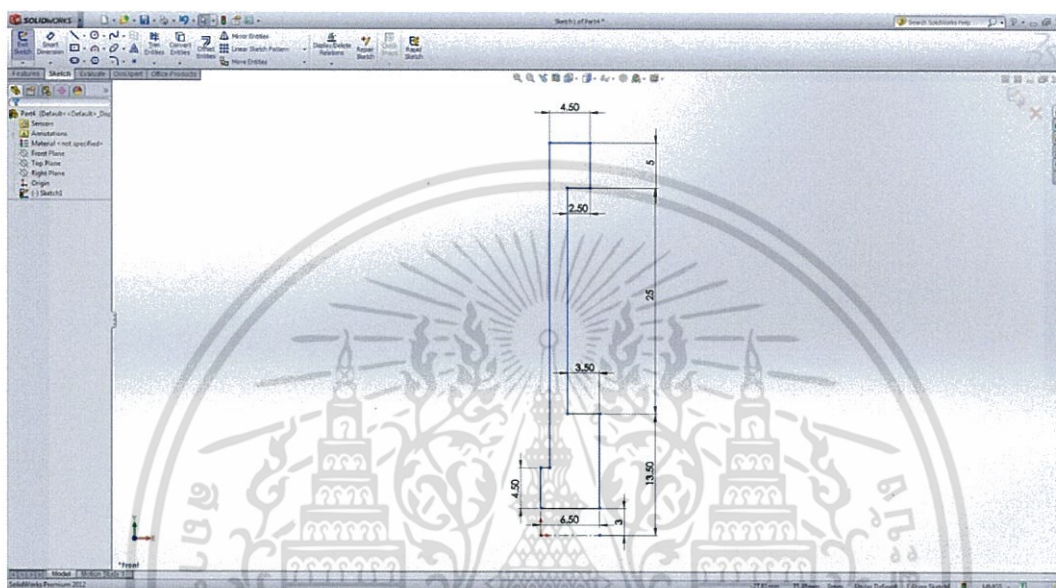
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 ล้อตุนกกำลัง

ในส่วนข้อล้อตุนกกำลังจะประกอบด้วยสามส่วนย่อยคือ ล้อตุนกกำลัง แกนล้อตุนกกำลัง และ ลูกปืน โดยมีวิธีการสร้างชิ้นงานดังนี้

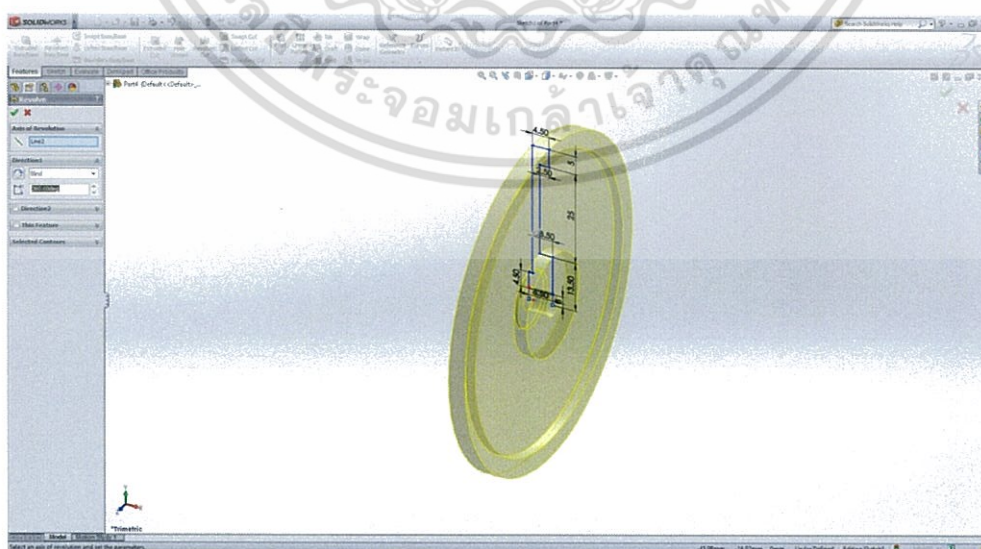
- ล้อตุนกกำลัง

1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “Glass” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.105



รูปที่ 3.105 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (97)

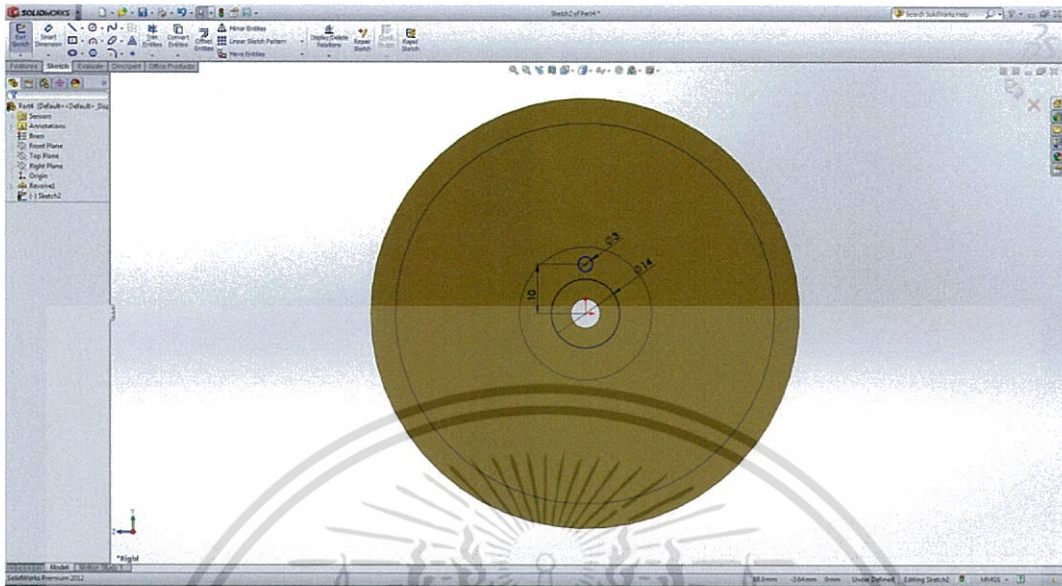
2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base” ในการขึ้นรูปสามมิติ



รูปที่ 3.106 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (98)

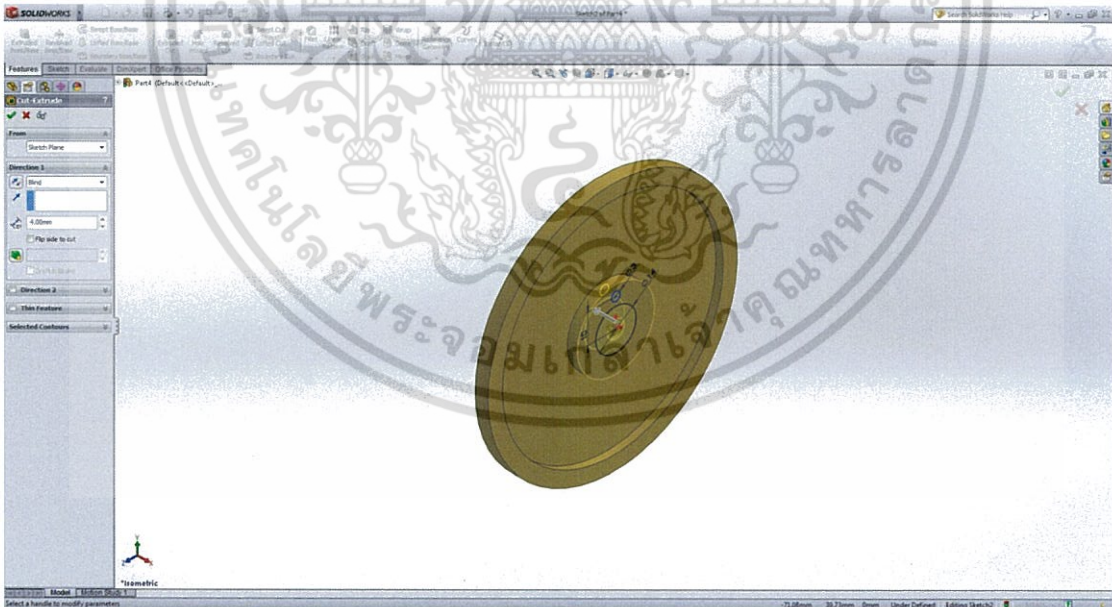
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วาดรูปวงกลมโดยใช้คำสั่ง “Circle”  ลงบนผิวชิ้นงานและกำหนดขนาดดังรูป



รูปที่ 3.107 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (99)

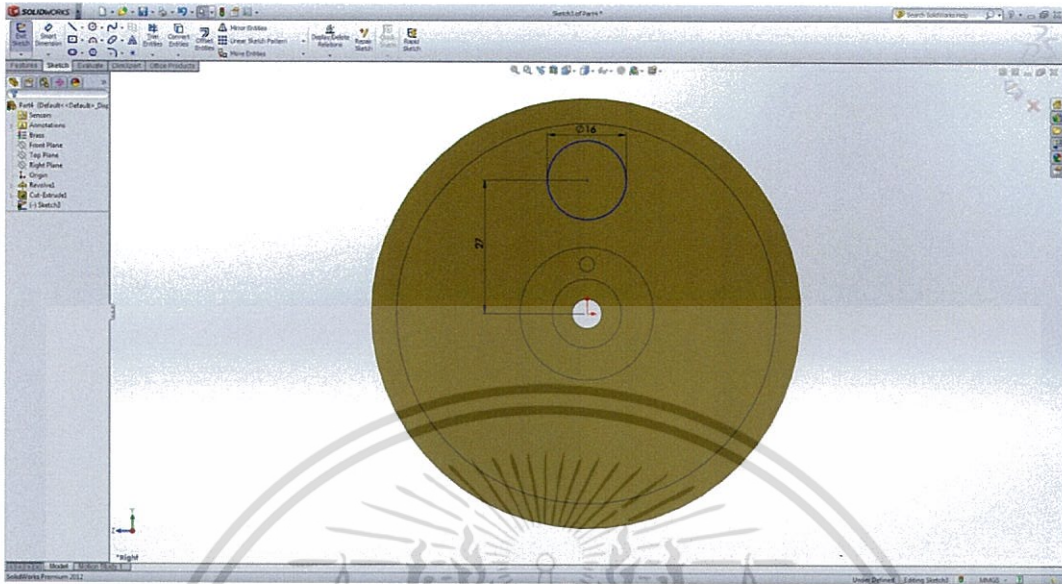
4. ใช้คำสั่ง “Extruded cut” โดยตัดแบบ “Blind” ลงไปเป็นระยะ 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.108 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (100)

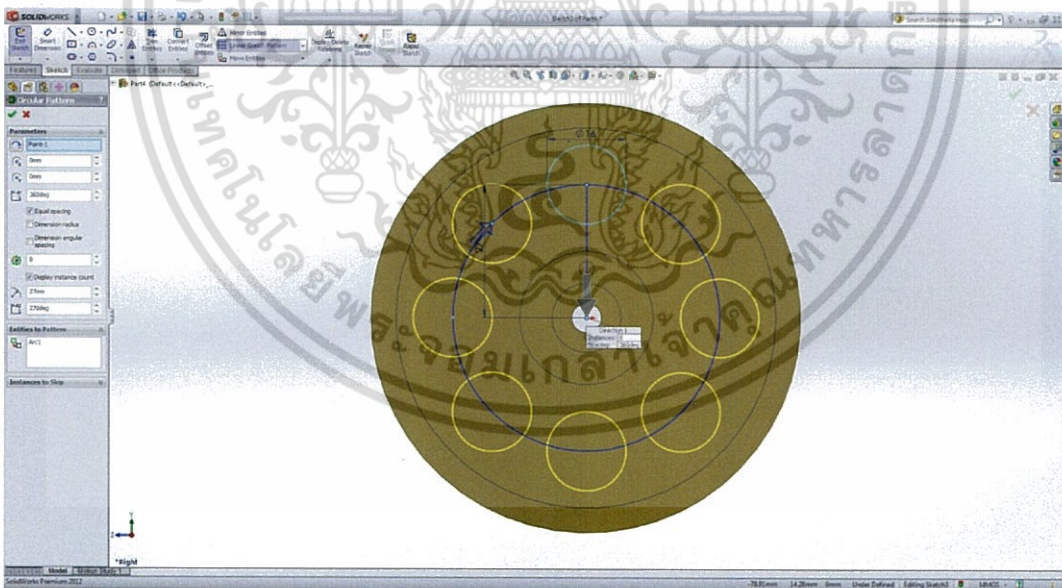
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วาดรูปวงกลมโดยใช้คำสั่ง “Circle”  ลงบนผิวชิ้นงานและกำหนดขนาดดังรูป



รูปที่ 3.109 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (101)

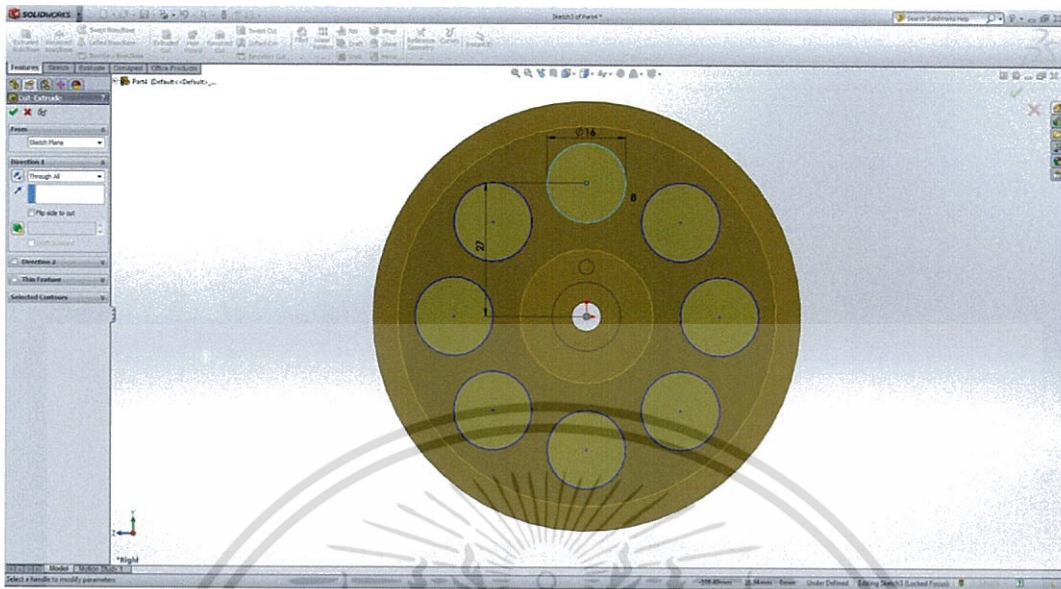
6. ใช้คำสั่ง “Circular pattern” ในการวาดวงกลมที่เหลือดังรูป



รูปที่ 3.110 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (102)

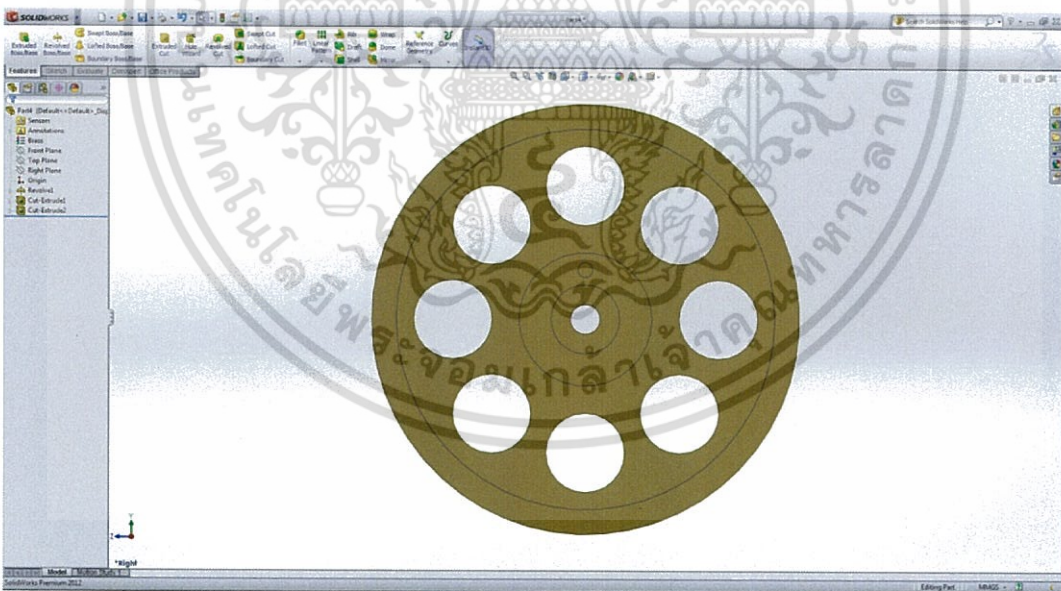
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ใช้คำสั่ง “Extruded cut” โดยตัดแบบ “Through all”



รูปที่ 3.111 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (103)

8. จะได้ชิ้นงานลือตุนกำลังดังรูป

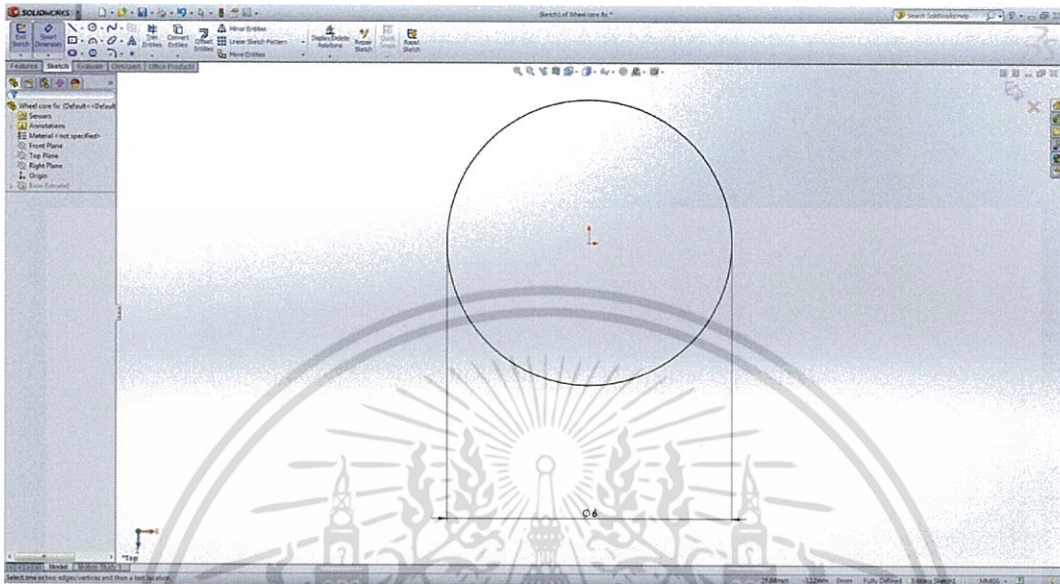


รูปที่ 3.112 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (104)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

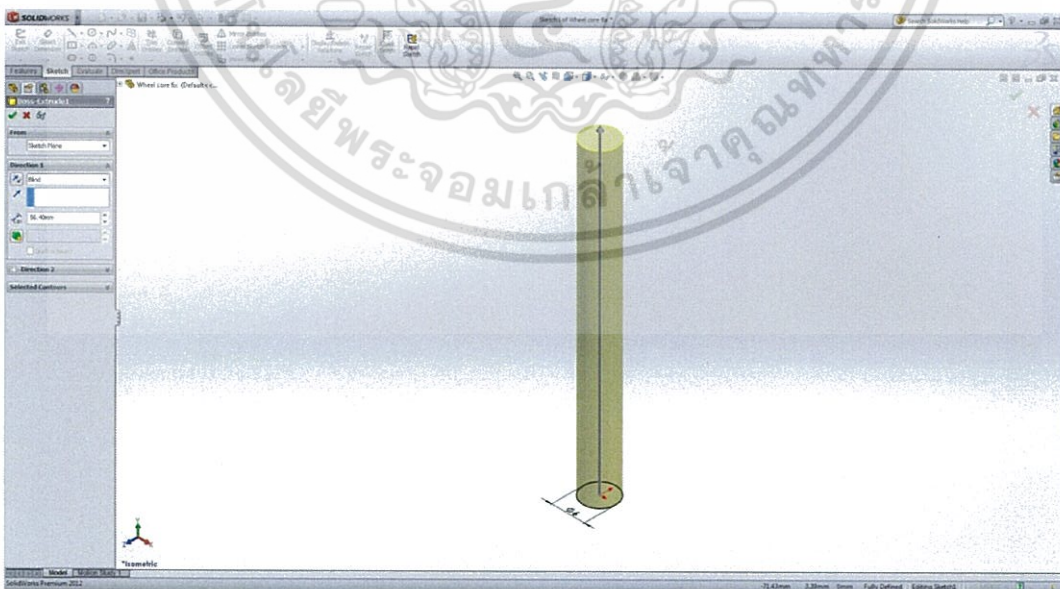
- แกนล้อตุนกำลัง

1. เลือก “Sketch” ที่ Top plane แล้วใช้คำสั่ง “Circle” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูปที่ 3.113



รูปที่ 3.113 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (105)

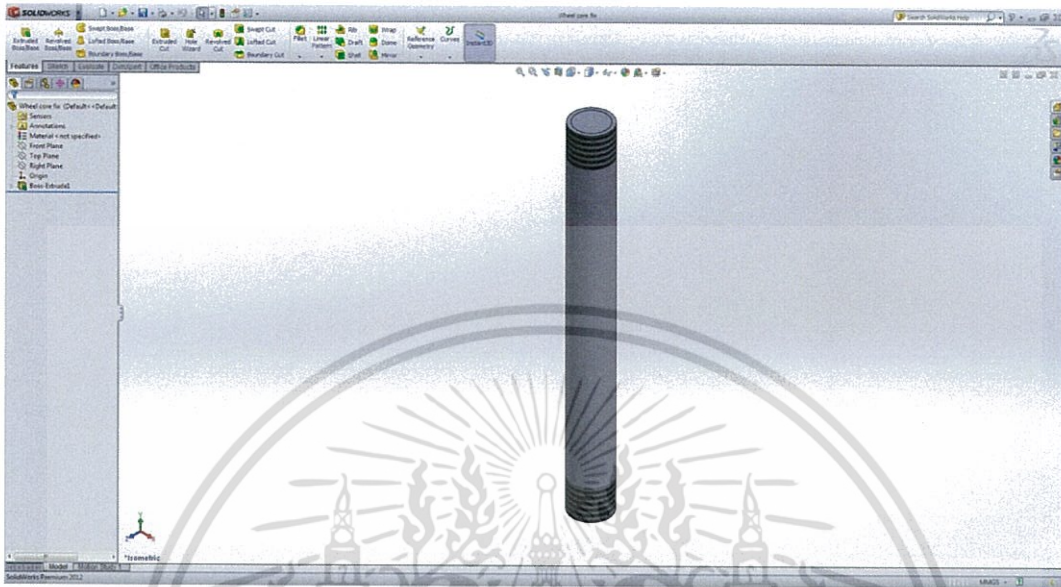
2. ใช้คำสั่ง “Extruded Boss/Base” รูป 3 มิติ โดยกำหนดความยาวของชิ้นงานเป็นระยะ 56.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.114 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (106)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

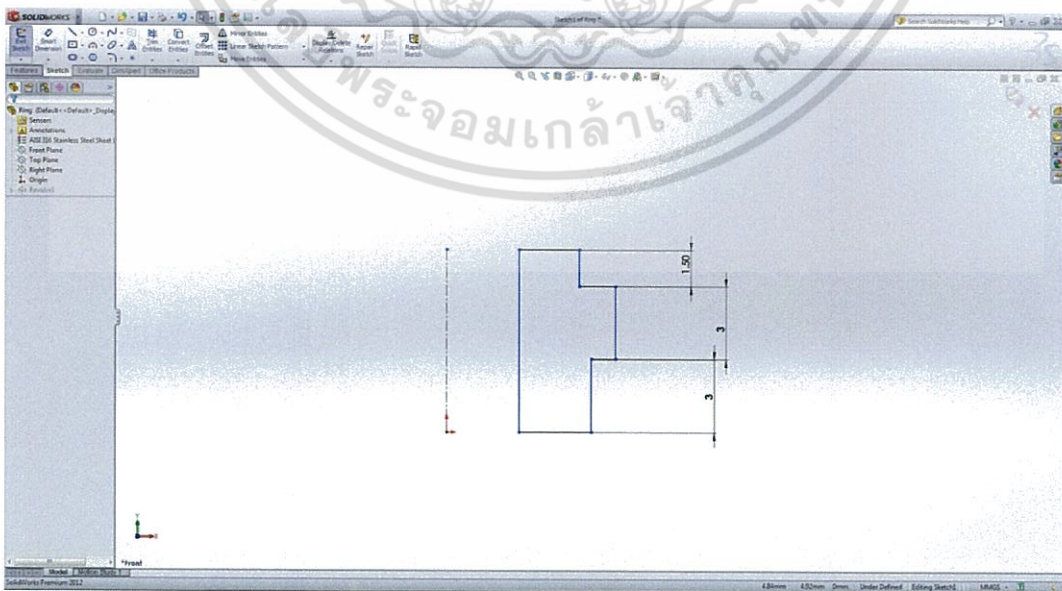
3. สร้างเกลียวโดยไปที่ “Insert” เลือก “Annotations” เลือก “Cosmetic Threads” จากนั้นเลือกพื้นที่ “Edge<1>” และ “Edge<2>” ของชิ้นงาน กำหนด Standards เป็น “ANSI Metric” กำหนดเป็นเกลียว “M6x0.8” โดยกำหนดความยาวของเกลียวเป็น “4 mm” ดังรูป



รูปที่ 3.115 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (107)

- ลูกปืน

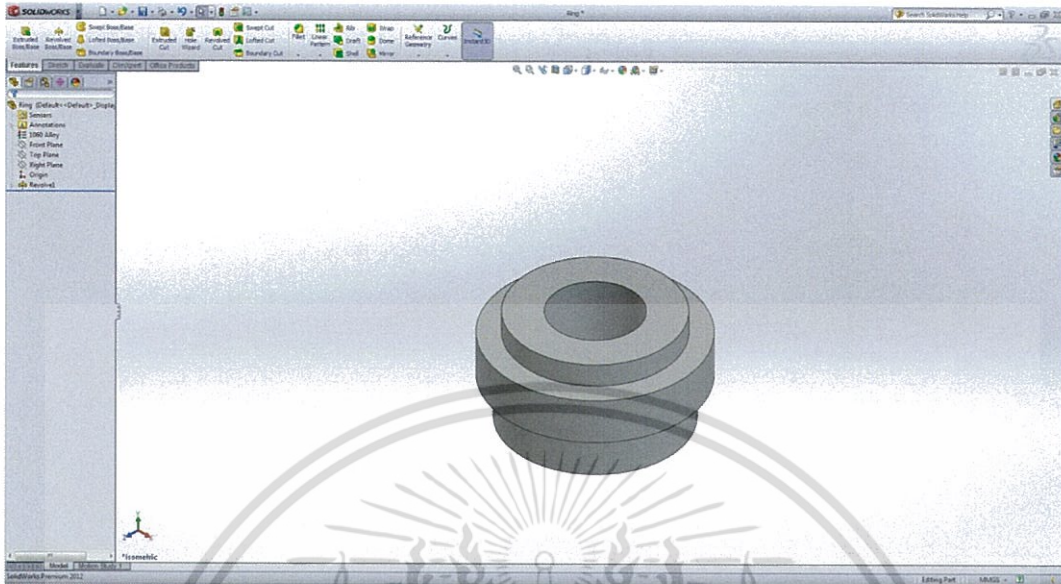
1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “Cast stainless steel” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Front plane แล้วใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกล โดยมีรูขนาดรัศมี 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.116



รูปที่ 3.116 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (108)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

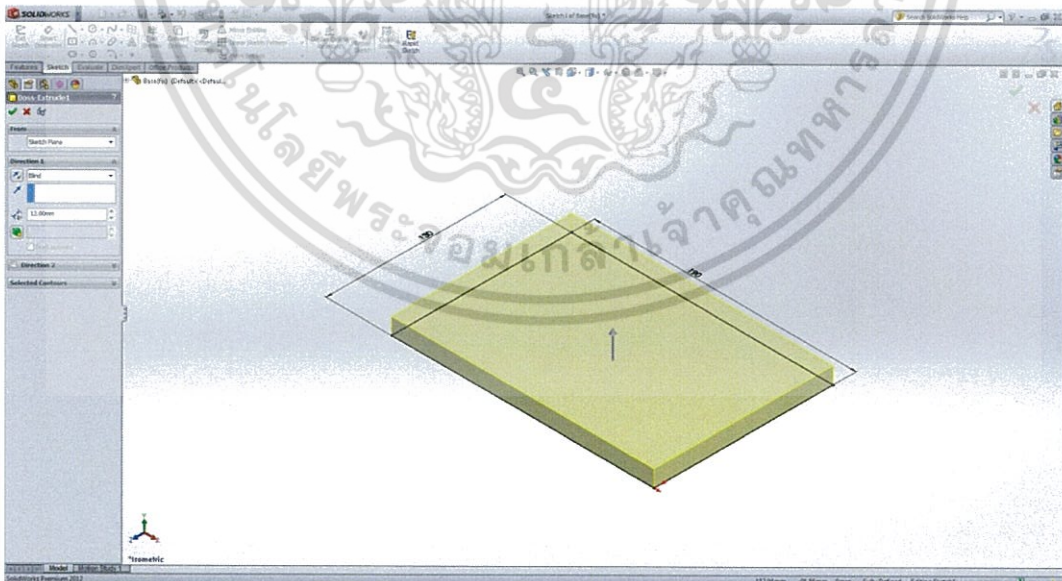
2. ใช้คำสั่ง “Revolved Boss/Base”  ในการขึ้นรูปสามมิติ จะได้ชิ้นงานดังรูป



รูปที่ 3.117 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (109)

3.2.8 ฐาน

1. เลือกวัสดุของชิ้นงานเป็น “Teak” จากนั้นเลือก “Sketch” ที่ Top plane แล้วใช้คำสั่ง “Line”  วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลดังรูป



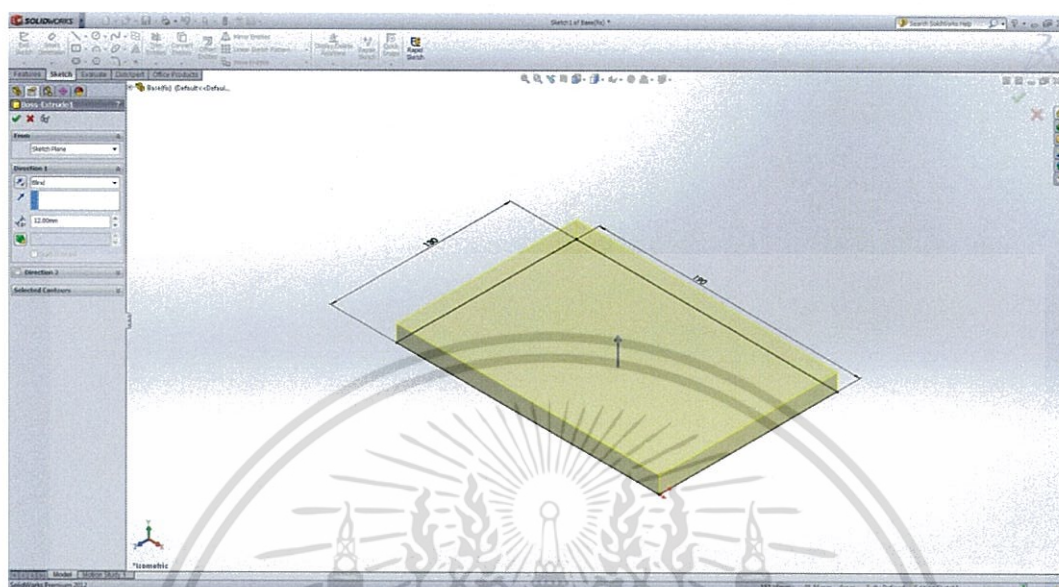
รูปที่ 3.118 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (110)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้คำสั่ง “Extruded Boss/Base”
ขึ้นงานเป็น “12 mm”

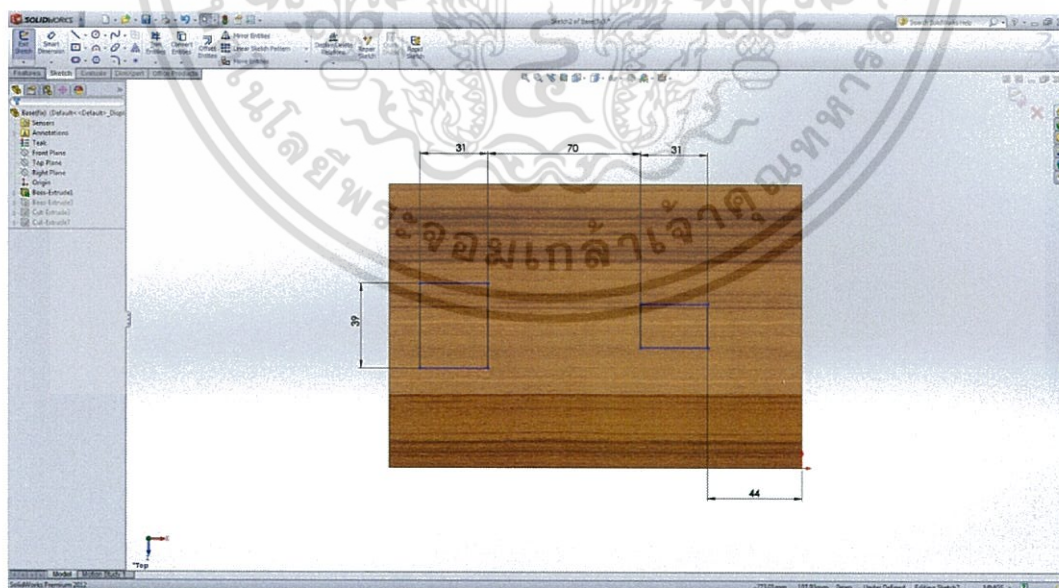


รูป 3 มิติ โดยกำหนดความหนาของ



รูปที่ 3.119 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (111)

3. ใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปที่ด้านบนของชิ้นงานและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลตั้งรูป



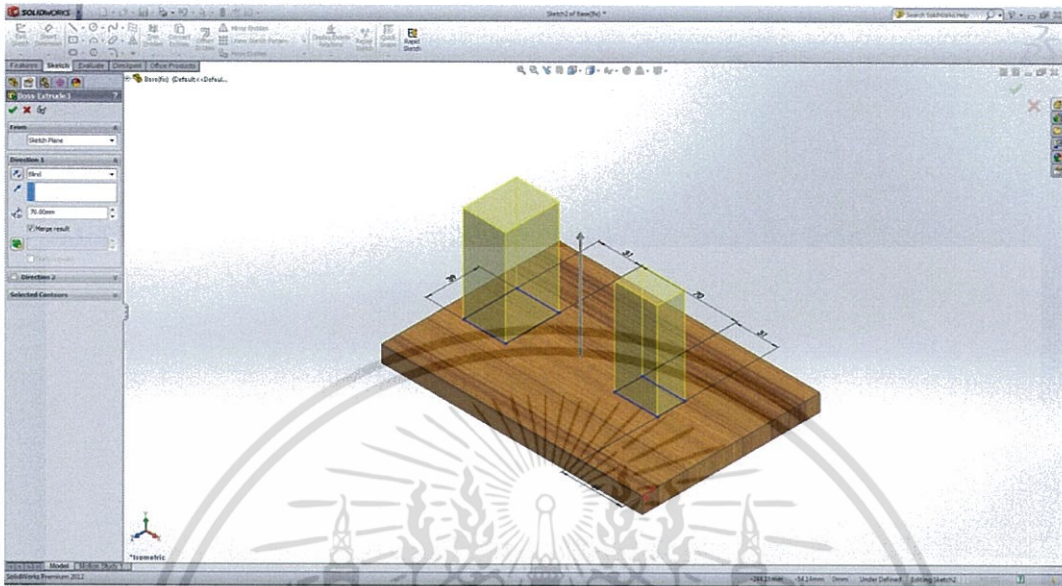
รูปที่ 3.120 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (112)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้คำสั่ง “Extruded Boss/Base”
 ชิ้นงานเป็น “70 mm”

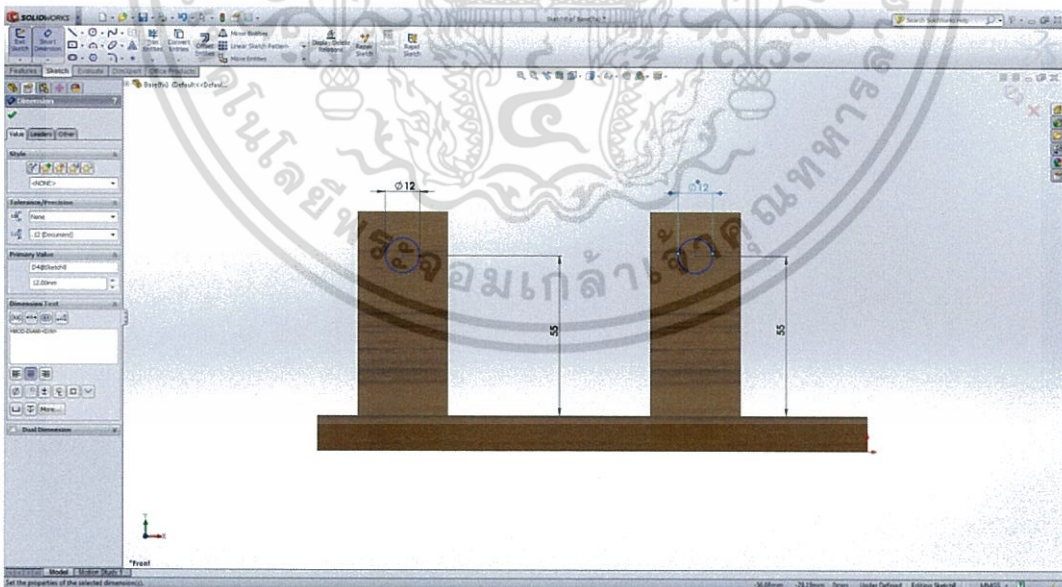


รูป 3 มิติ โดยกำหนดความยาวของ



รูปที่ 3.121 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (113)

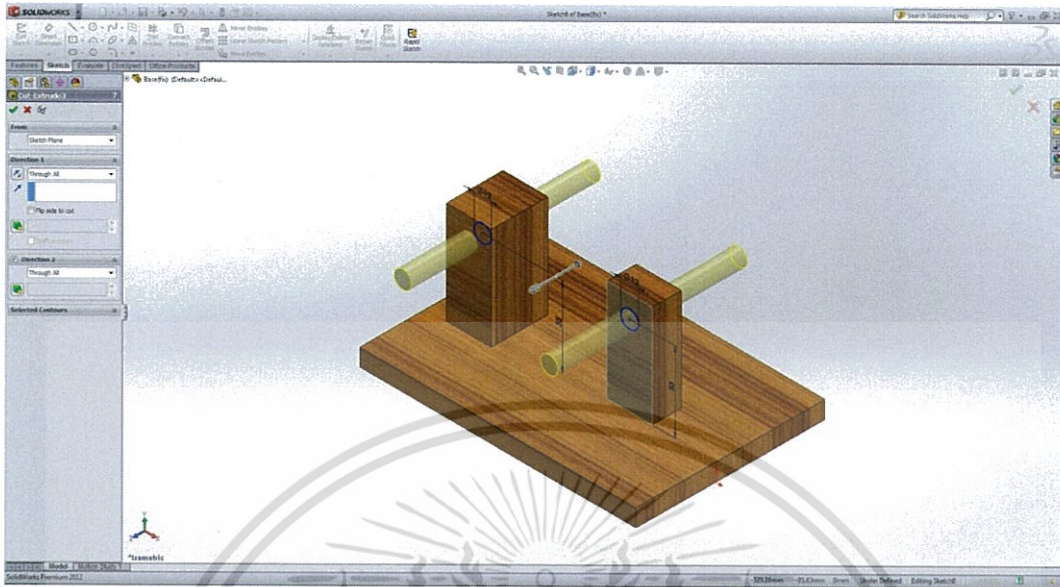
5. ใช้คำสั่ง “Circle” วาดรูปและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกล



รูปที่ 3.122 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (114)

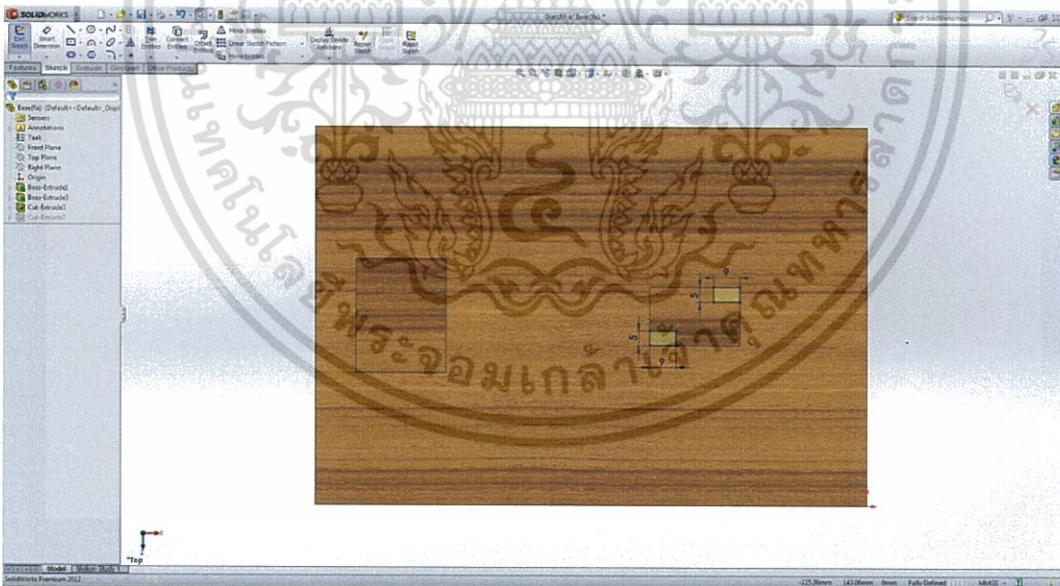
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ใช้คำสั่ง “Extruded cut” โดยตัดแบบ “Through all”



รูปที่ 3.123 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (115)

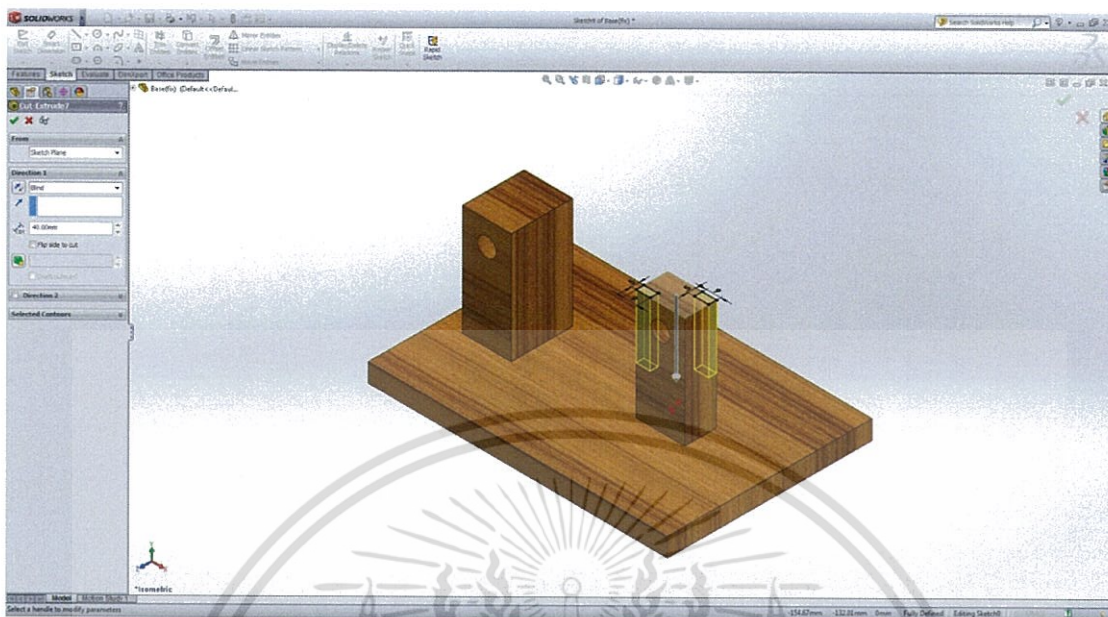
7. ใช้คำสั่ง “Sketch” วาดรูปสี่เหลี่ยมและกำหนดขนาดที่ด้านบนของชิ้นงานดังรูป



รูปที่ 3.124 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (116)

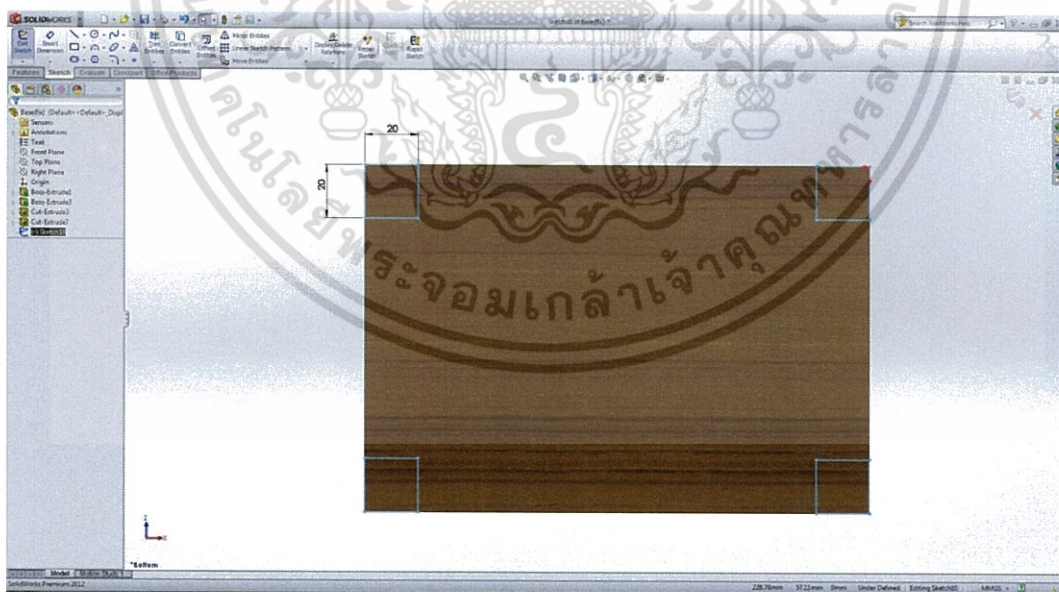
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ใช้คำสั่ง “Extruded cut” โดยตัดแบบ “Blind” ลงไปเป็นระยะ 40 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.125 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (117)

9. ใช้คำสั่ง “Line” วาดรูปที่ด้านล่างของชิ้นงานและใช้ “Smart dimension” ในการกำหนดสเกลตั้งรูป



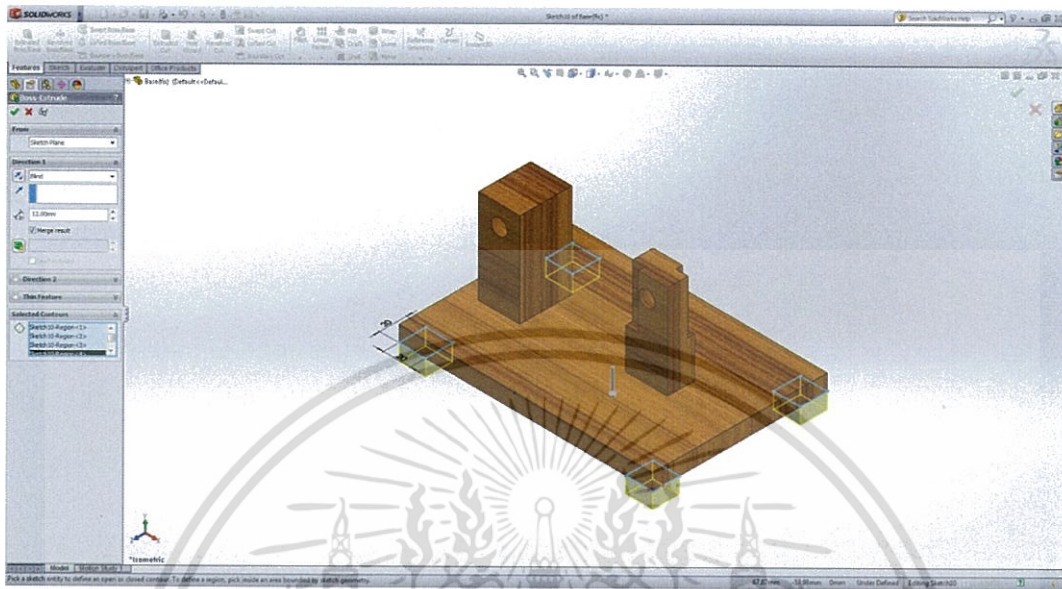
รูปที่ 3.126 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (118)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ใช้คำสั่ง “Extruded Boss/Base”
ขึ้นงานเป็น “12 mm”



รูป 3 มิติ โดยกำหนดความหนาของ



รูปที่ 3.127 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (119)

11. จะได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ดังรูป



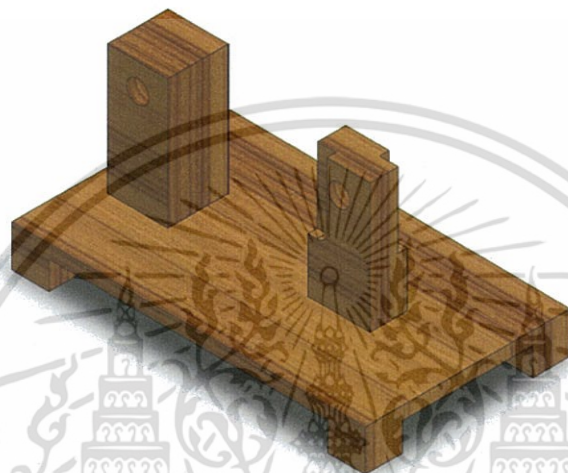
รูปที่ 3.128 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (120)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

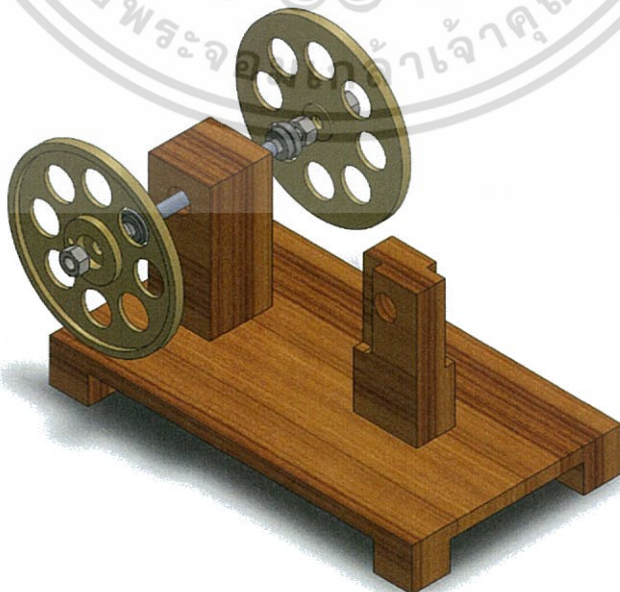
เมื่อทำการสร้างชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เสร็จแล้ว ต้องทำการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์เพื่อใช้ในการทดสอบ โดยมีวิธีการประกอบและทดสอบชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ดังนี้

1. ทำการประกอบฐานของเครื่องยนต์โดยการประกอบเสาของเครื่องยนต์ทั้งสองโดยใช้ โบลท์หัวจมขนาด M5 ยึดระหว่างเสากับฐานของเครื่องยนต์เมื่อประกอบแล้วจะได้ฐานของเครื่องยนต์ดังรูป



รูปที่ 3.129 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (1)

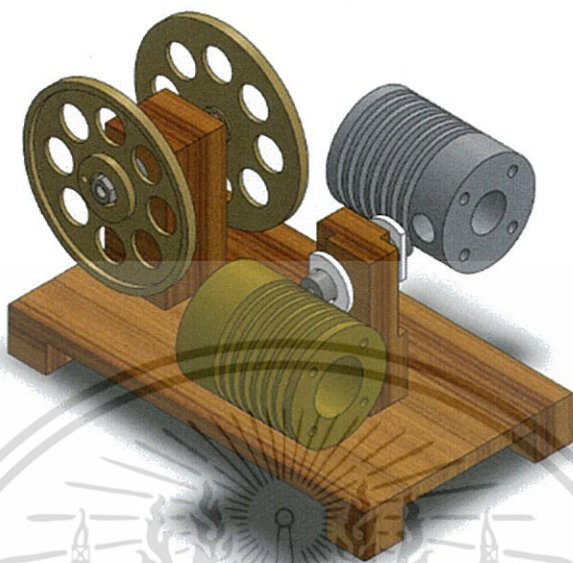
2. จากนั้นทำการประกอบล้อตุนกำลังของเครื่องยนต์โดยใช้ลูกปืนช่วยลดแรงเสียดทานทำให้ล้อตุนกำลังหมุนได้ดีขึ้นและใช้ขนาด M6 ยึดล้อตุนกำลัง โดยในขณะที่ประกอบเครื่องยนต์ควรเช็ค การหมุนของล้อตุนกำลังควรใช้ล้อตุนกำลังหมุนอย่างสมดุลและไม่มีการสั่น



รูปที่ 3.130 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (2)

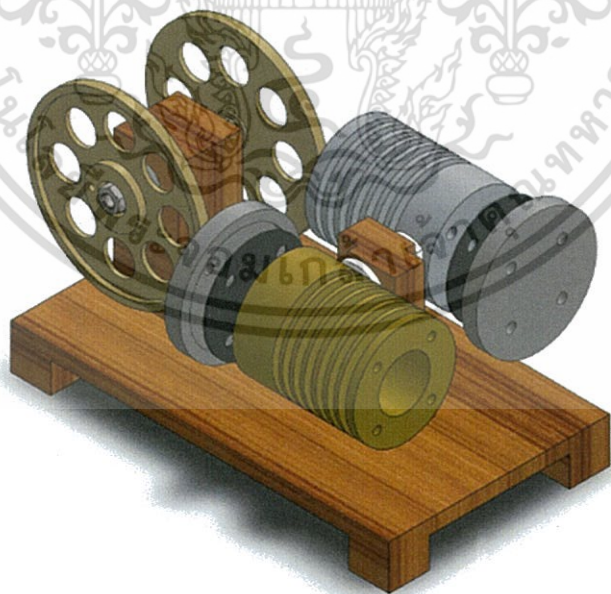
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการประกอบฮีดซิงค์และท่ออากาศเข้ากับฐานของเครื่องยนต์ โดยใช้แหวนยางกั้นระหว่างฮีดซิงค์กับเสาของฐานแล้วยึดให้แน่น



รูปที่ 3.131 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (3)

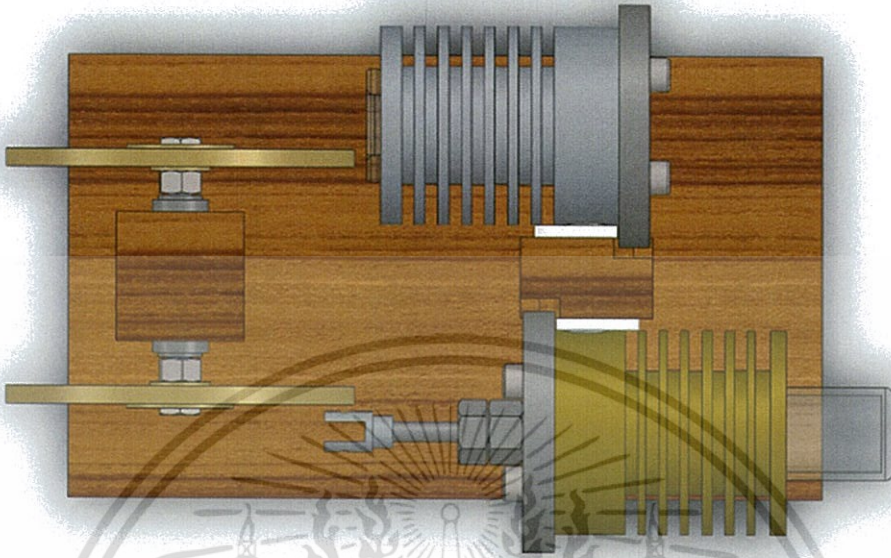
4. ประกอบบูชเข้ากับฮีดซิงค์ทั้งสองโดยใช้ไปเกินทนไฟกั้นระหว่างบูชและฮีดซิงค์เพื่อลดการรั่วของอากาศภายในกระบอกสูบ และใช้โบลท์ขนาด M4 ยึดบูชเข้ากับฮีดซิงค์



รูปที่ 3.132 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (4)

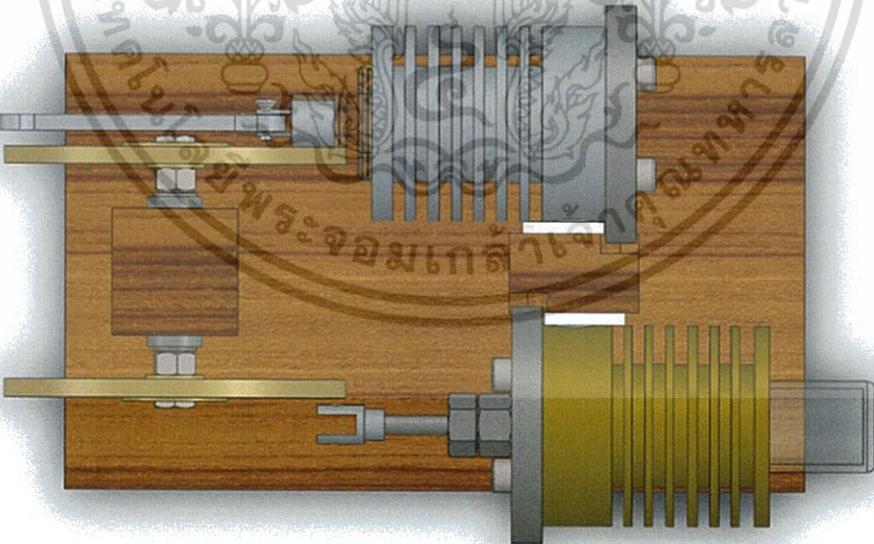
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากนั้นประกอบลูกสูบดีสเพลสเซอร์เข้ากับกระบอกสูบดีสเพลสเซอร์ โดยทดลองเลื่อนลูกสูบเพื่อทดสอบความลื่นของลูกสูบ ลูกสูบควรเคลื่อนที่อย่างลื่นไหลไม่ติดขัด



รูปที่ 3.133 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (5)

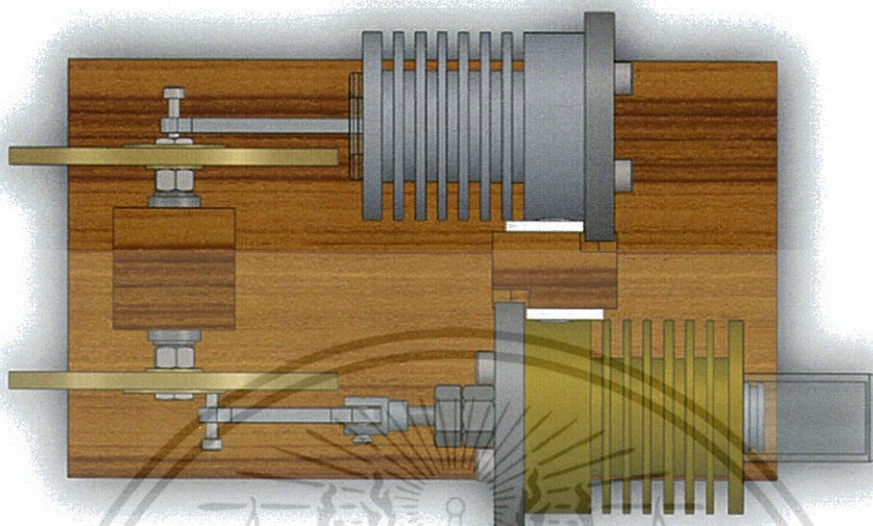
6. ประกอบลูกสูบกำลังเข้ากับกระบอกสูบกำลังแล้วทำการเลื่อนเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ของลูกสูบ



รูปที่ 3.134 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (6)

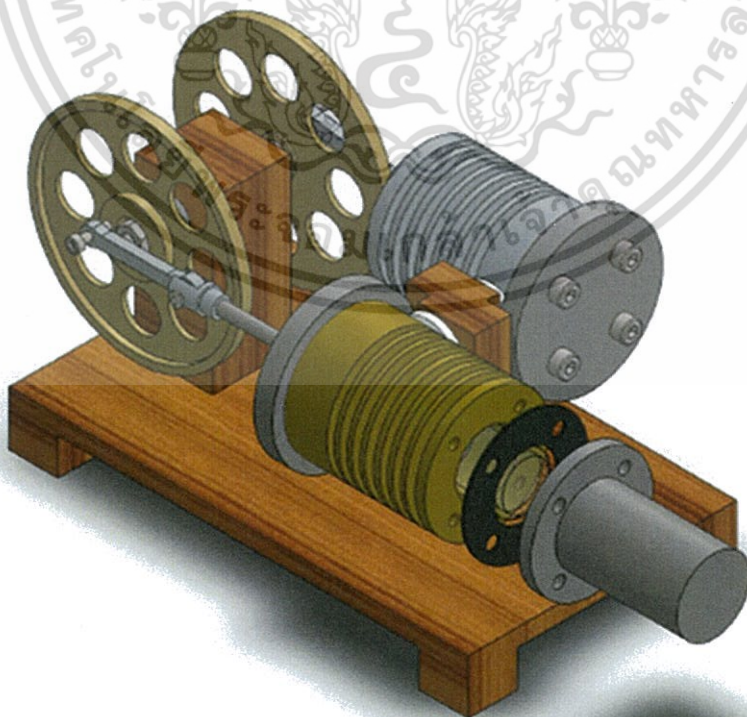
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ประกอบข้อเหวี่ยงเข้ากับก้านลูกสูบทั้งสอง จากนั้นหมุนล้อตุนกำลังเพื่อดูการเคลื่อนที่ของลูกสูบซึ่งควรเคลื่อนที่อย่างสมดุลและล้อตุนกำลังไม่ควรแกว่งไปมา



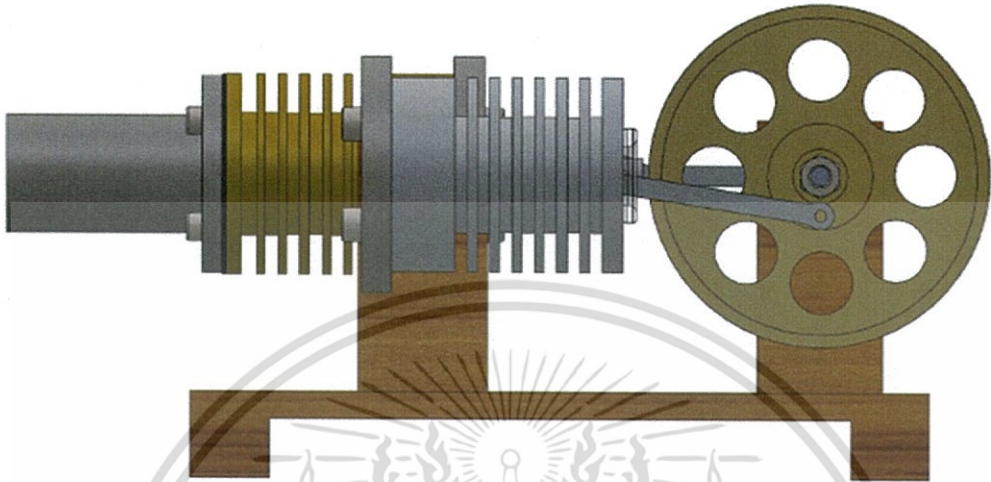
รูปที่ 3.135 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (7)

8. จากนั้นประกอบฮีตเตอร์เข้ากับฮีตซิงค์ดีสเพลสเซอร์โดยใช้โบลท์ขนาด M4 ยึด และใช้โปเกนทนความร้อนกั้นระหว่างฮีตเตอร์และฮีตซิงค์เพื่อลดการรั่วของอากาศ



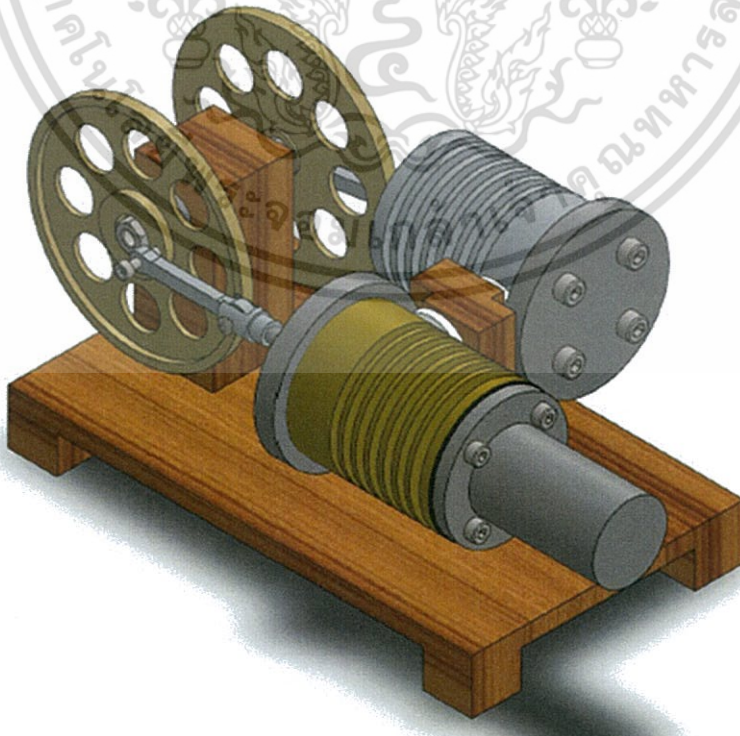
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.136 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (8) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. จากนั้นทำการทดสอบอากาศรั่วโดยถอดข้อเหวี่ยงกำลังจากล้อตุ่นกำลัง จากนั้นหมุนล้อตุ่นกำลัง เมื่อหมุนล้อตุ่นกำลังแล้วลูกสูบกำลังควรเคลื่อนที่ตามลูกสูบดิสเพลสเซอร์ นั้นแสดงว่าเครื่องยนต์ไม่มีอากาศรั่ว



รูปที่ 3.137 การประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (9)

เมื่อทำการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดและทำการทดสอบเบื้องต้น จะได้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 3.138 ใช้งานสามมิติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

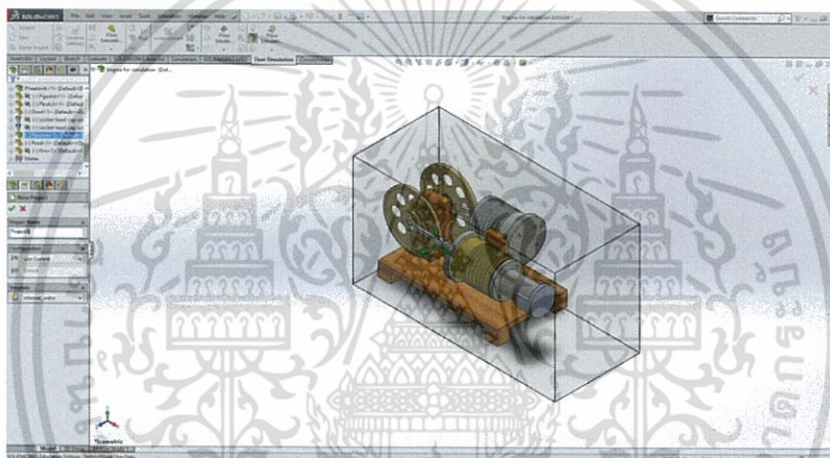
3.3 การใช้โปรแกรม SolidWorks ในการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

นอกจากจะถูกใช้ในการออกแบบชิ้นงานสามมิติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแล้ว โปรแกรม SolidWorks ยังมีคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญนั่นคือ การวิเคราะห์ทางด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านกลศาสตร์ เทอร์โมไดนามิกส์ และการไหลของของไหล ซึ่งในโครงการพิเศษเล่มนี้ จะทำการวิเคราะห์เครื่องยนต์ ในเรื่องการไหลของของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์

3.3.1 การตั้งค่าโปรแกรมในการวิเคราะห์ของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์

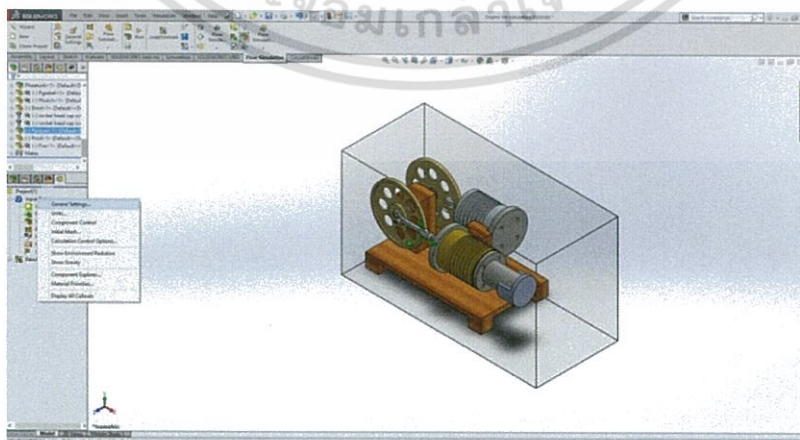
ในการวิเคราะห์ของไหลทำงานในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้น จะทำการวิเคราะห์เพื่อเฝ้าดูอุณหภูมิของของไหลทำงานภายในกระบอกสูบ รวมทั้งลักษณะทิศทางการไหล รวมทั้งอุณหภูมิของโลหะที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยมีวิธีการตั้งค่าโปรแกรมดังนี้

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



รูปที่ 3.139 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (121)

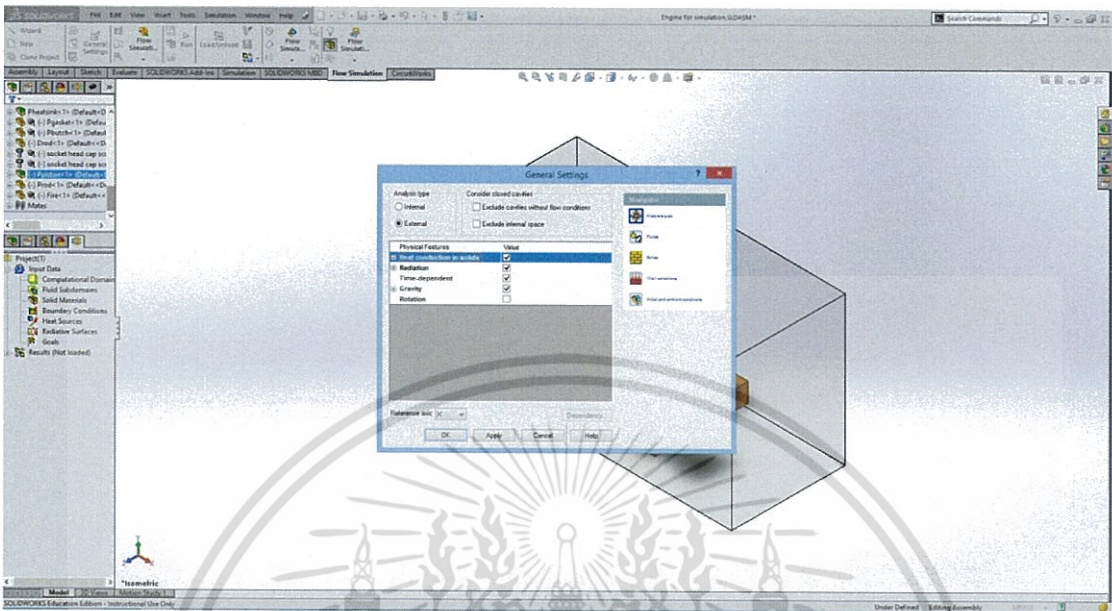
2. คลิกขวาที่ “Input Data” แล้วเลือก “General setting” เพื่อทำการตั้งค่า



รูปที่ 3.140 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (122)

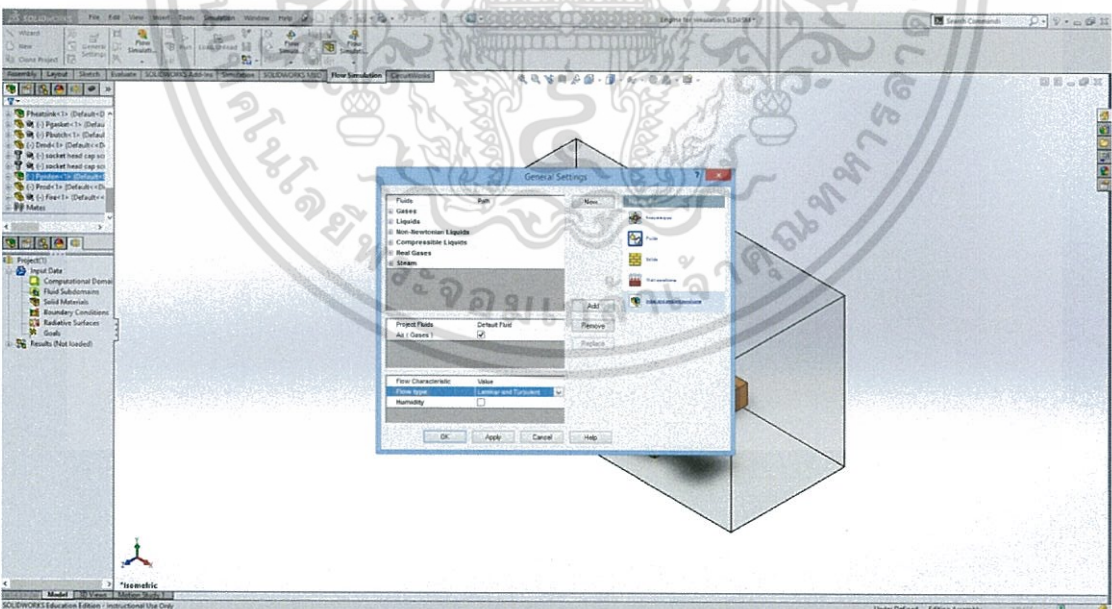
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.141 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (123)

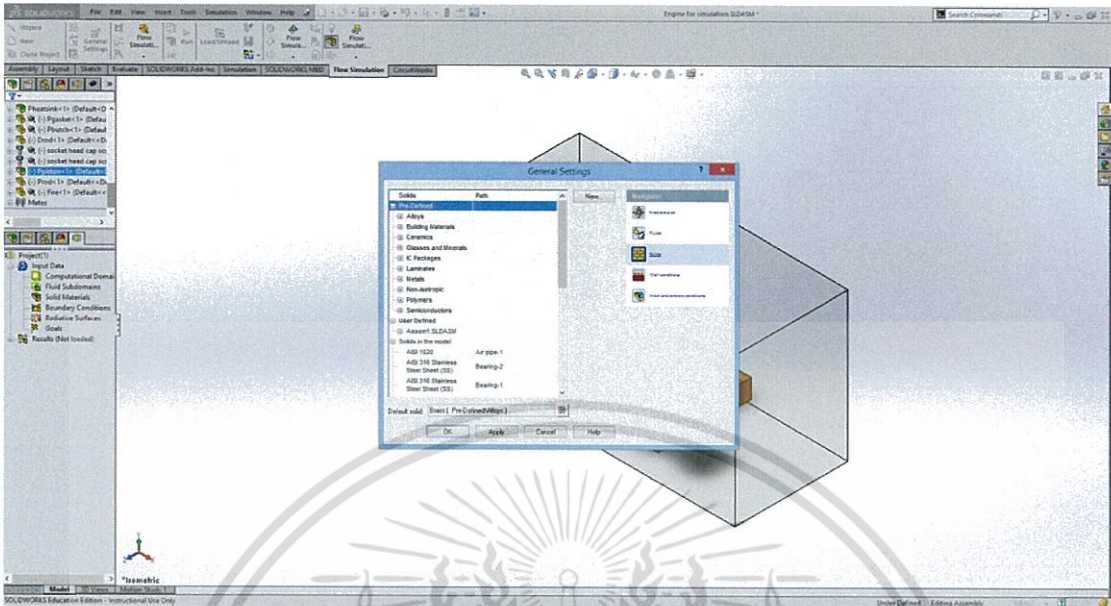
4. ตั้งค่า “Air (gases)” เป็น Default fluid



รูปที่ 3.142 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (124)

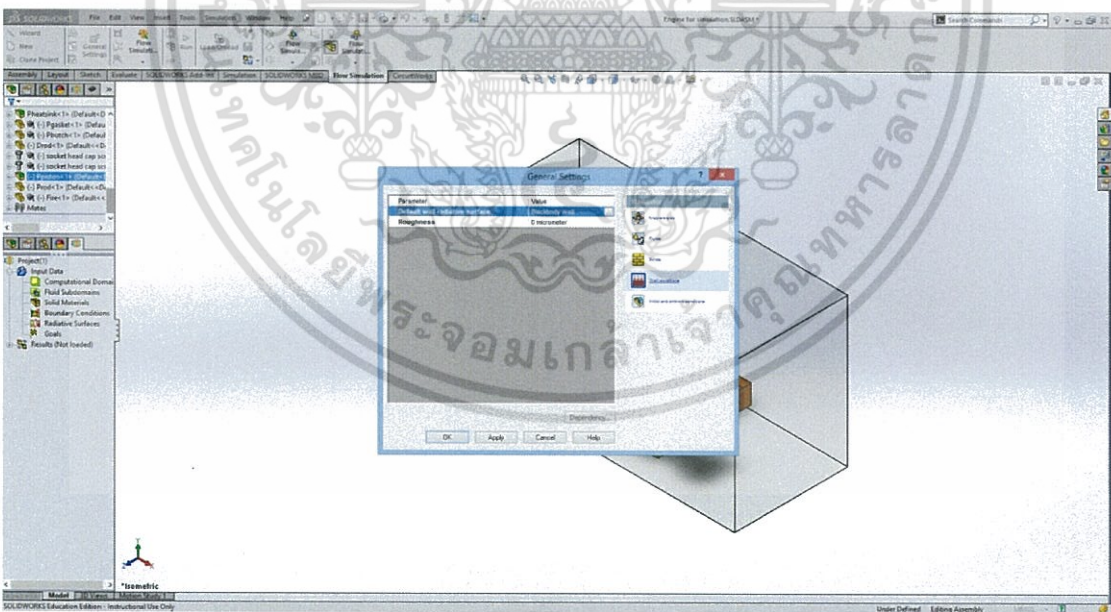
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตั้งค่า Solids โดยเลือก “Brass” เป็น Default Fluid



รูปที่ 3.143 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (125)

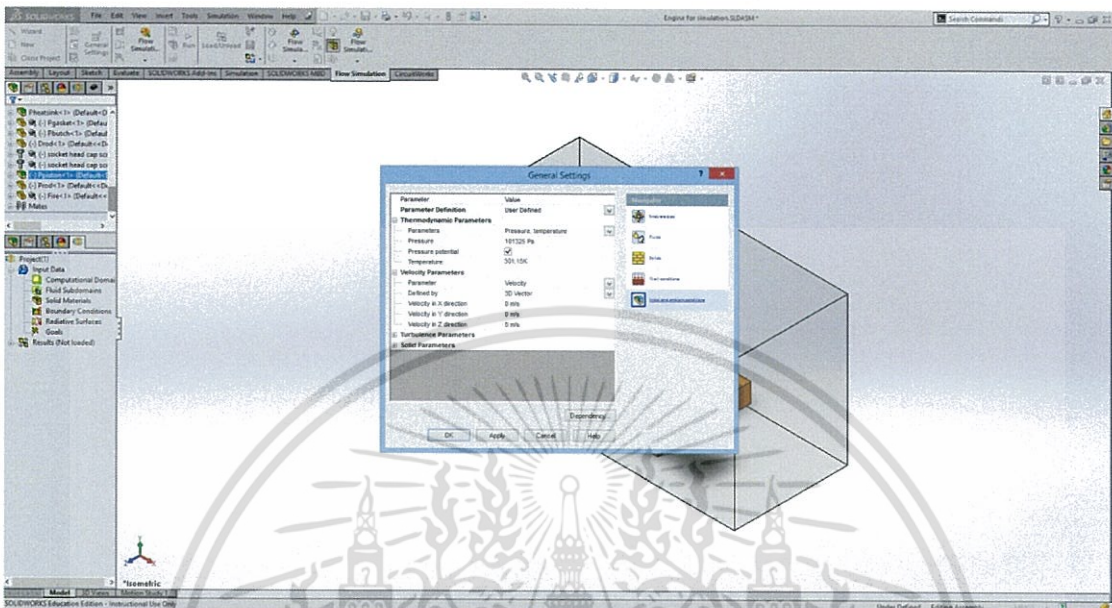
6. Wall condition ให้ตั้งค่าไว้ตามเดิม



รูปที่ 3.144 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (126)

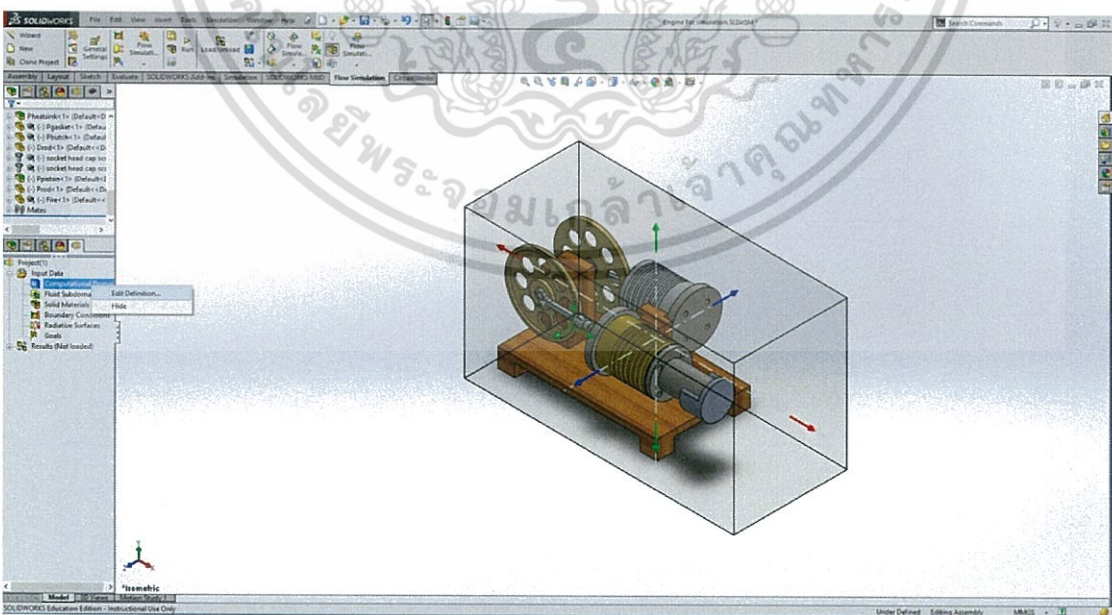
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 3.145 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (127)

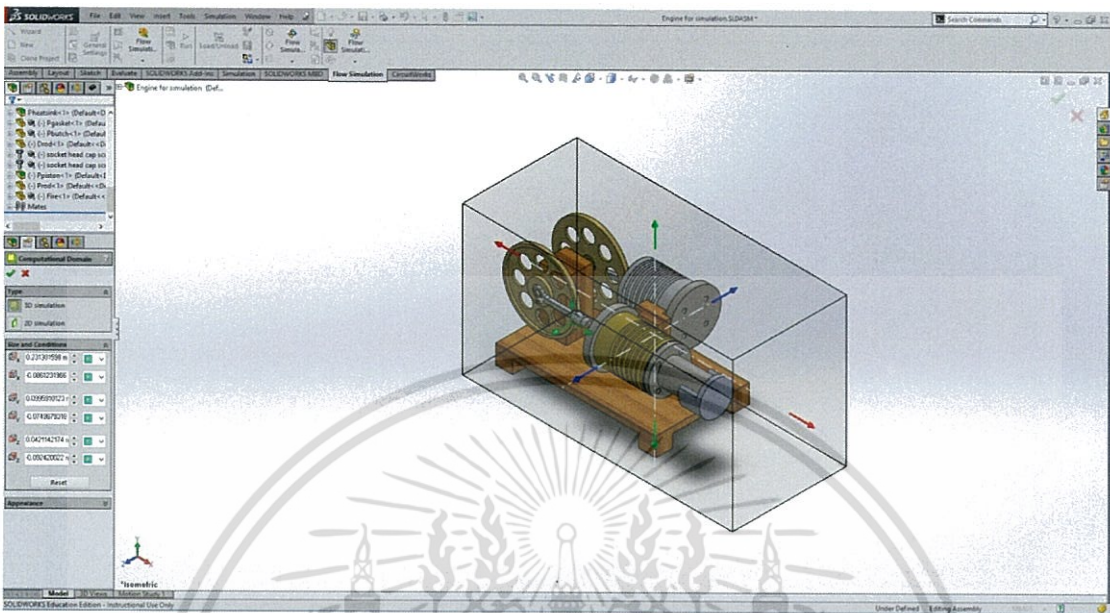
8. จากนั้นให้คลิกขวาที่ “Computational Domain” แล้วเลือก “Edit Definition” เพื่อกำหนดขนาดของโดเมน



รูปที่ 3.146 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (128)

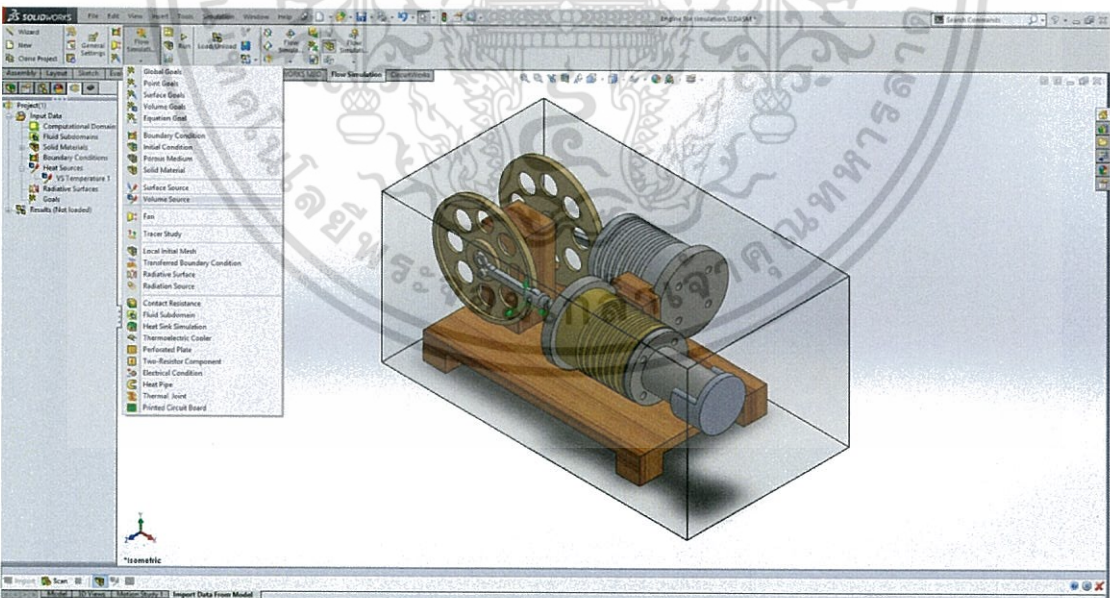
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. กำหนดค่าโดเมนโดยลากลูกศรที่ทิศ X Y และ Z ควรกำหนดให้โดเมนมีความพอดีกับชิ้นงานไม่ควรใหญ่เกินไปเพราะจะทำให้เวลาในการวิเคราะห์หมีค่ามาก



รูปที่ 3.147 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (129)

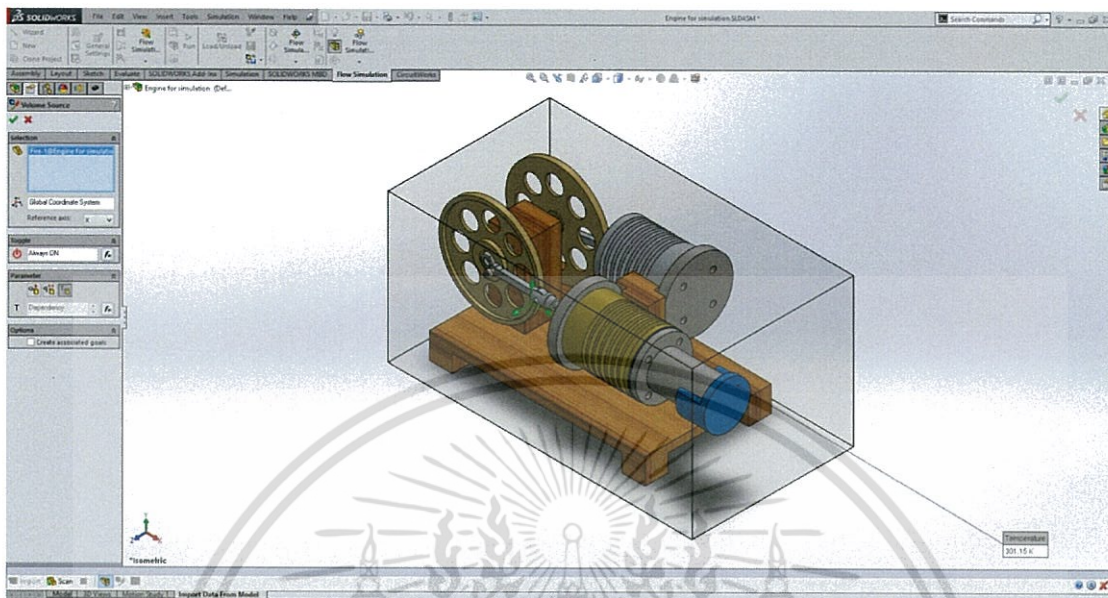
10. คลิกที่ “Flow Simulation Features” แล้วเลือก “Volume Source”



รูปที่ 3.148 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (130)

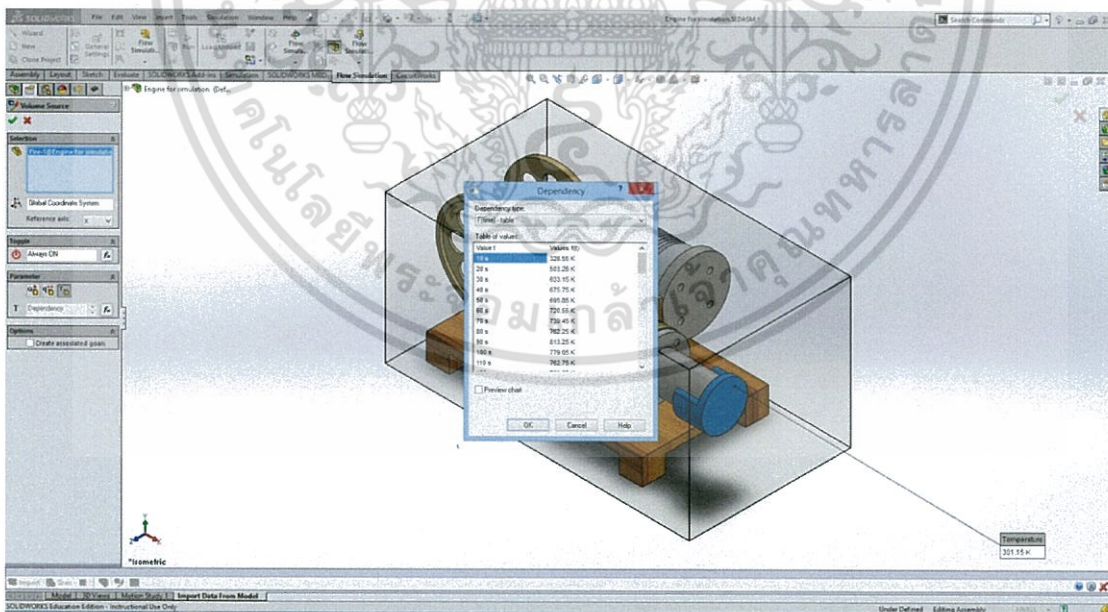
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.149 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (131)

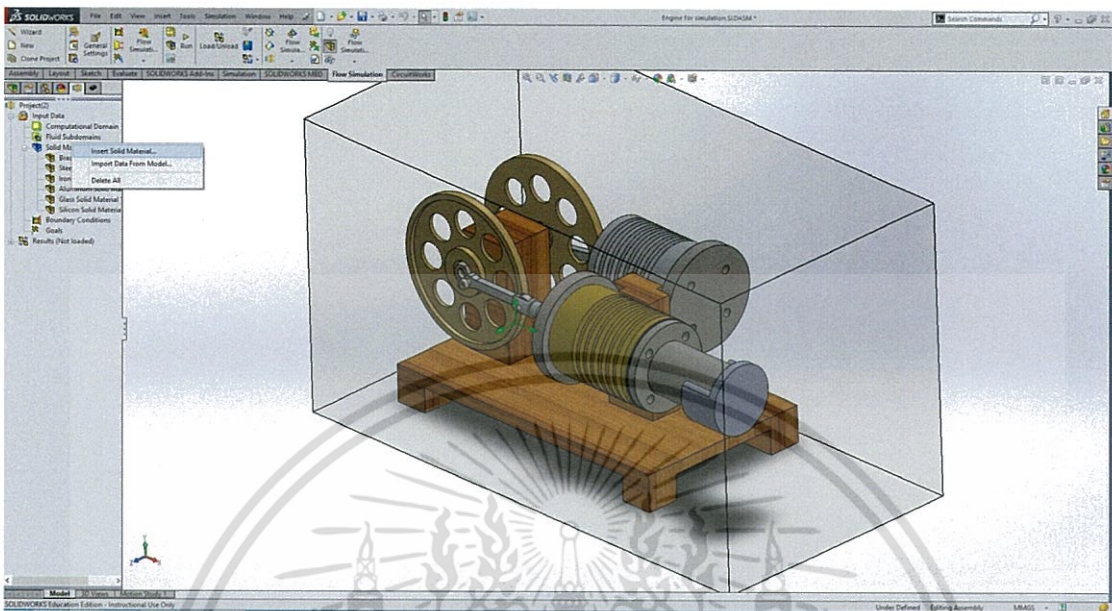
12. เลือก Dependency type เป็น “F(time)-table” จากนั้นใส่ค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 3.150 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (132)

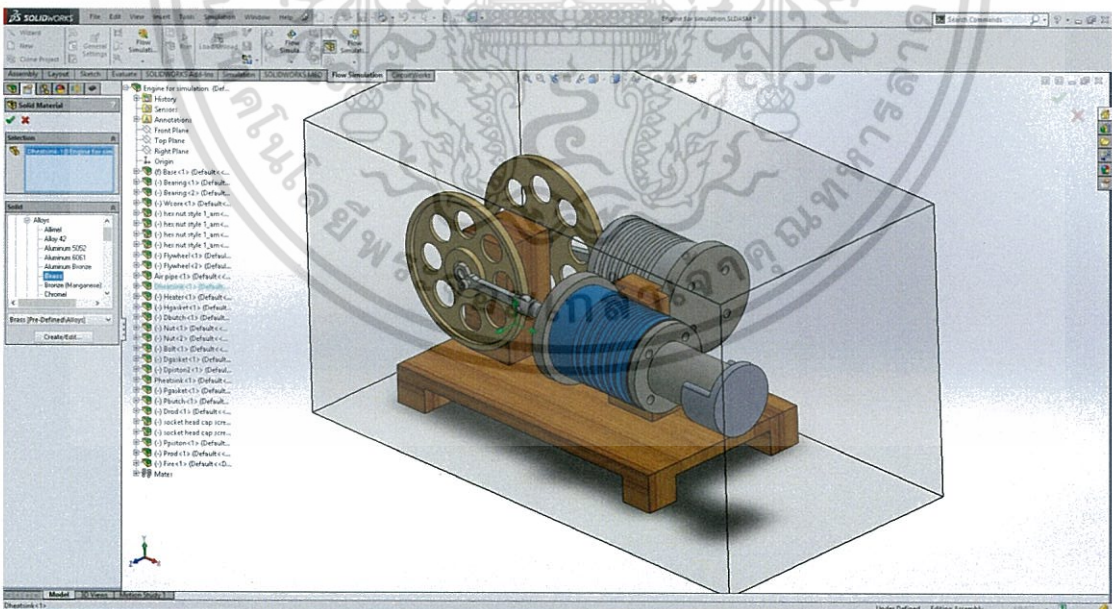
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.151 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (133)

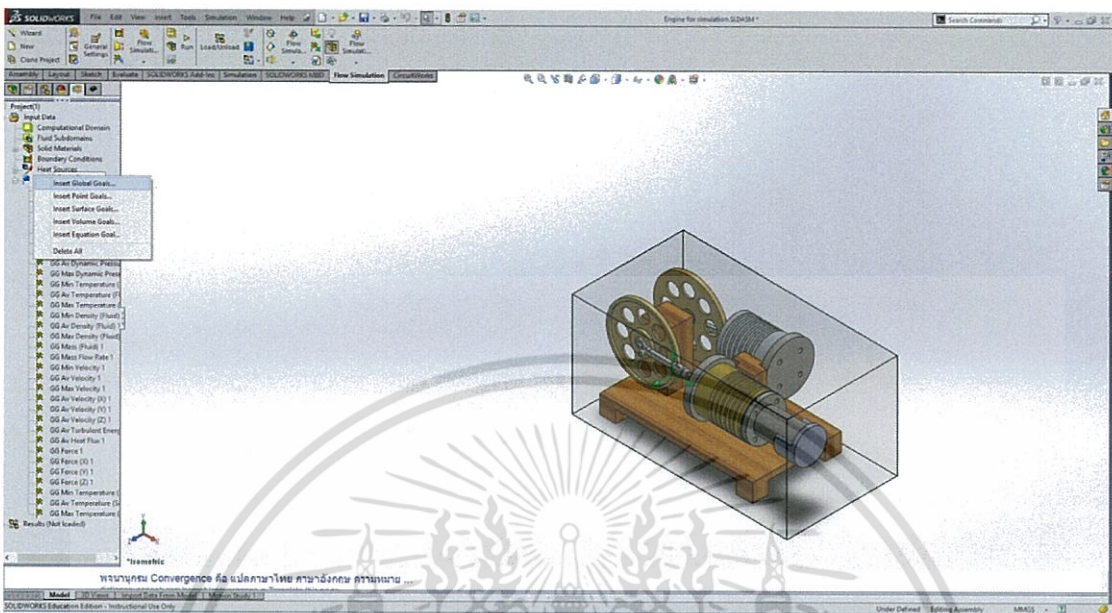
14. เลือก Material ของชิ้นส่วนต่างๆ ตามที่ออกแบบไว้แล้วกดตกลง



รูปที่ 3.152 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (134)

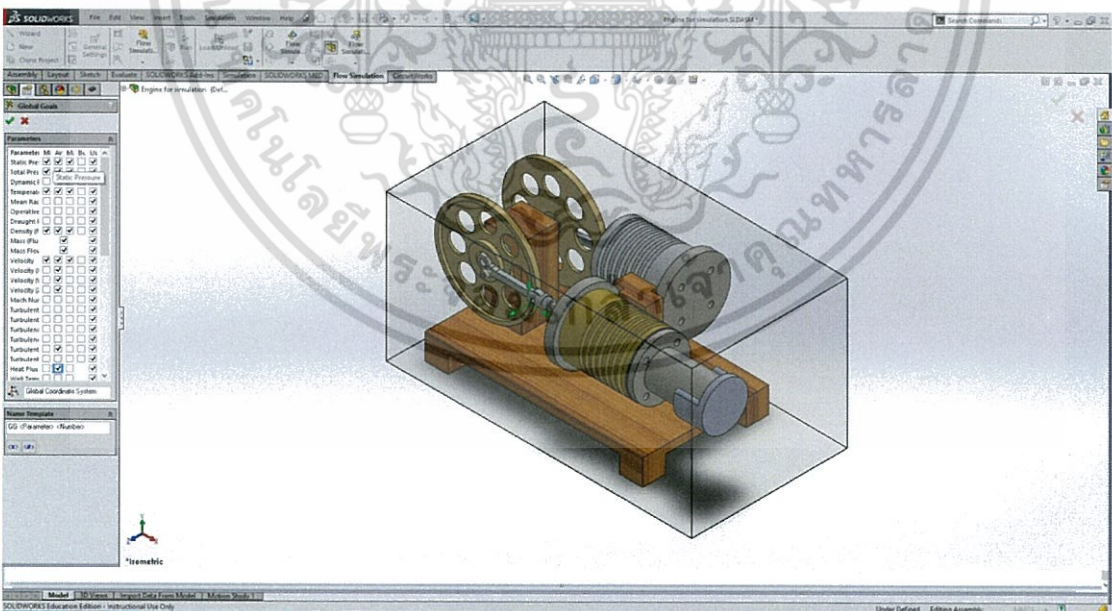
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.153 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (135)

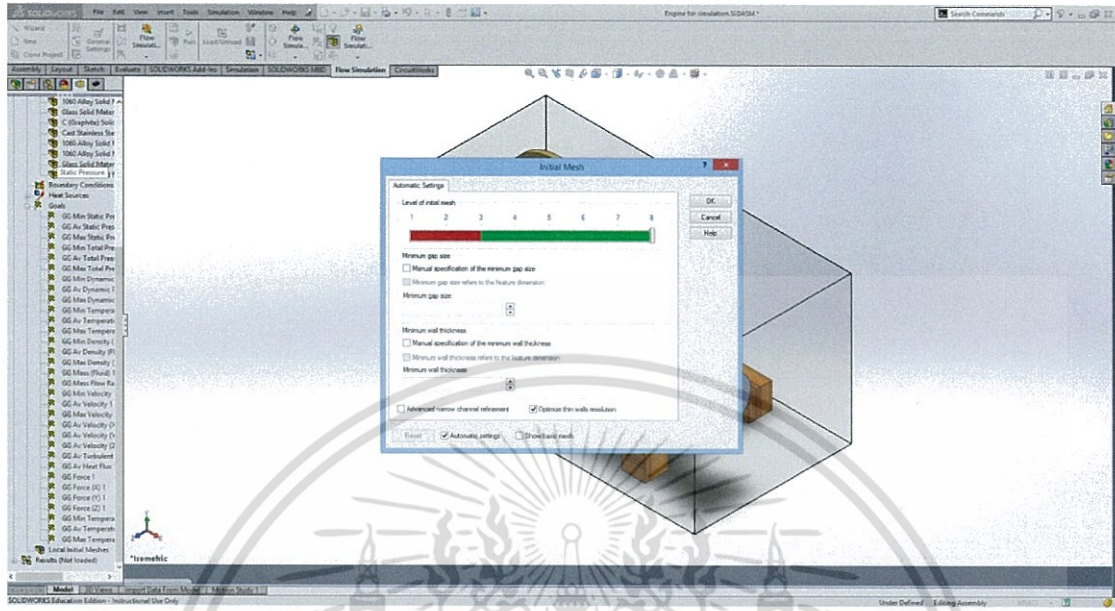
16. ทำการเลือก Goal ที่ต้องการศึกษา จากนั้นกดตกลง



รูปที่ 3.154 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (136)

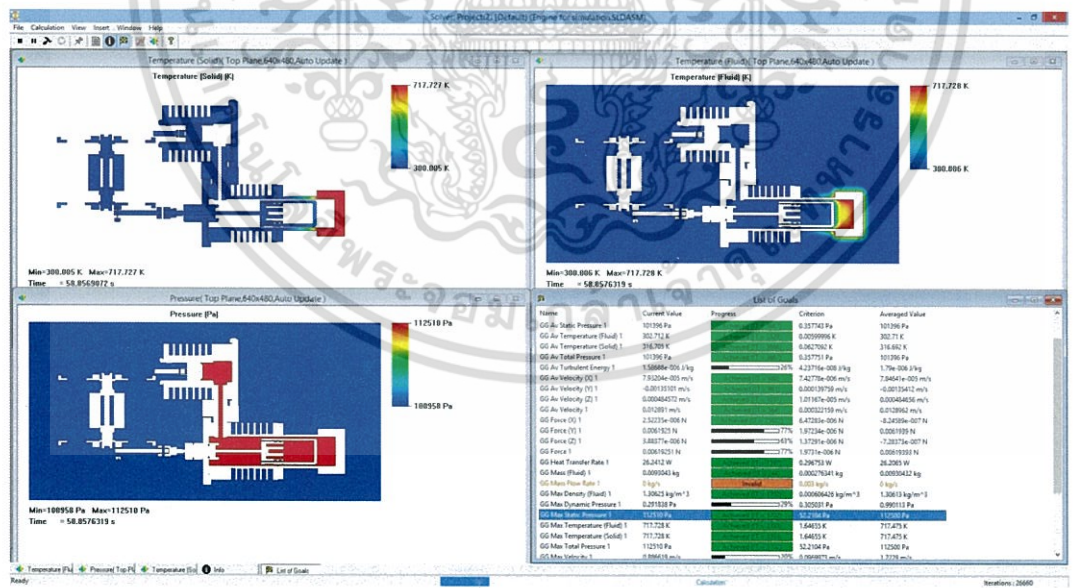
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. คลิกที่ “Initial Mesh” แล้วทำการตั้งค่า “Level of Initial Mesh” เป็นระดับ 8 จากนั้นกดตกลง



รูปที่ 3.155 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (137)

18. จากนั้นกด “Run” โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ โดยจะมีหน้าต่างดังรูป



รูปที่ 3.156 หน้าต่างโปรแกรม Solid works (138)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 เครื่องมือในการสร้างและการวัดผลเพื่อวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ในการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นต้องอาศัยเครื่องมือทางการผลิตเครื่องกลต่างๆ นักศึกษาได้ทำการสร้างช่วงแรกระหว่างฝึกงานที่ หน่วยผลิตเครื่องกล การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เขื่อนอุบลรัตน์ และได้นำกลับมาทำต่อที่อาคารซ่อมสร้าง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังจนแล้วเสร็จ

3.4.1 เครื่องมือในการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

- เครื่องกลึง (Manual lathe)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



รูปที่ 3.157 เครื่องกลึง (Manual lathe)



รูปที่ 3.158 การสร้างล้อตุนกำลังโดยใช้เครื่องกลึง (Manual lathe)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องกัด (Milling machine)

เป็นอีกหนึ่งเครื่องมือหลักที่ใช้ในการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการกัดเจาะรูหลายๆที่มีรูปแบบเป็นวง (Circular pattern)



รูปที่ 3.159 เครื่องกัด (Milling machine)

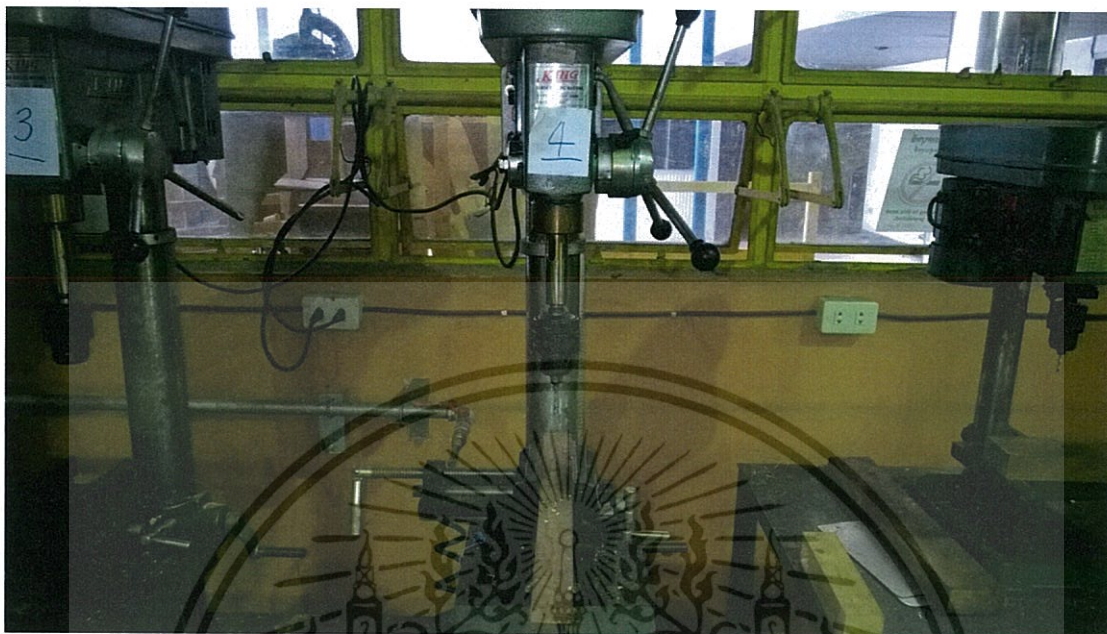


รูปที่ 3.160 การกัดชิ้นงานข้อเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องเจาะ (Drilling machine)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเจาะฐานไม้ของเครื่องยนต์และโปเกนทนความร้อน



รูปที่ 3.161 เครื่องเจาะ (Drilling machine)

- เลื่อยตัดเหล็ก (Chain saw)

เป็นเครื่องมือที่ช่วยทุ่นแรงในการตัดเหล็กแท่งขนาดใหญ่



รูปที่ 3.162 เลื่อยตัดเหล็ก (Chain saw)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องตัดแก้ว (Glass cutter)

ใช้ในการตัดชิ้นส่วนที่เป็นแก้วยกตัวอย่างเช่น ลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง



รูปที่ 3.163 เครื่องตัดแก้ว (Glass cutter)

3.4.2 เครื่องมือในการวัดผลเพื่อการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

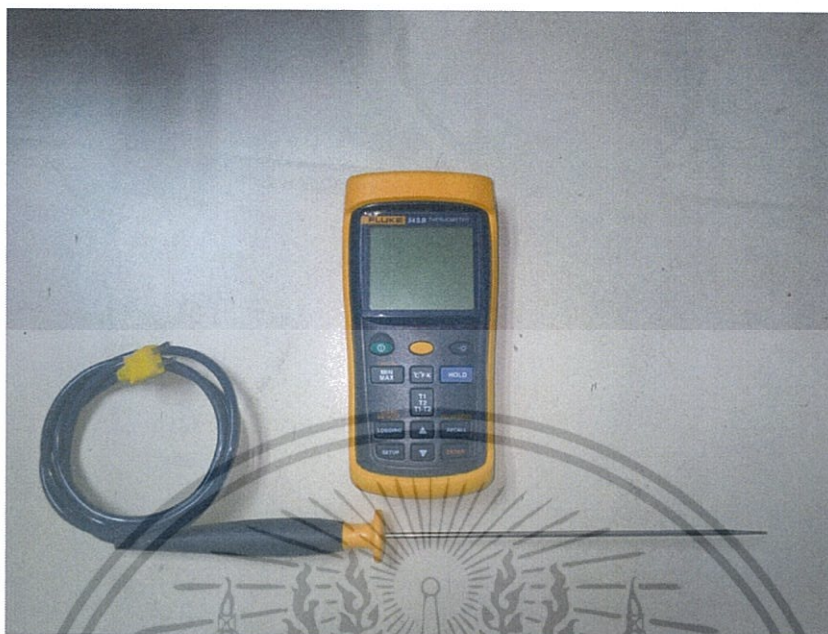
ในการวัดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์นั้นต้องทำการวัดอุณหภูมิของกระบอกสูบทั้งสองฝั่งและรอบการทำงานของเครื่องยนต์เพื่อนำมาคำนวณความดันภายในของเครื่องยนต์เพื่อใช้ในการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในของเครื่องยนต์กับปริมาตรขยายซึ่งจะนำค่าความดันที่ได้ไปหาค่ากำลังขาออกของเครื่องยนต์ในหนึ่งวัฏจักรและประสิทธิภาพทางความร้อน โดยในการเก็บข้อมูลนั้นจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดข้อมูลดังรูปที่ 3.155



รูปที่ 3.164 การวัดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เทอร์โมมิเตอร์ FLUKE รุ่น 54-2B และเทอร์โมคัปเปิล FLUKE รุ่น



รูปที่ 3.165 เทอร์โมมิเตอร์ FLUKE รุ่น 54-2B และเทอร์โมคัปเปิล FLUKE รุ่น 80pk-26

- เครื่องวัดความเร็วรอบ Lutron รุ่น DT-2236



รูปที่ 3.166 เครื่องวัดความเร็วรอบ Lutron รุ่น DT-2236

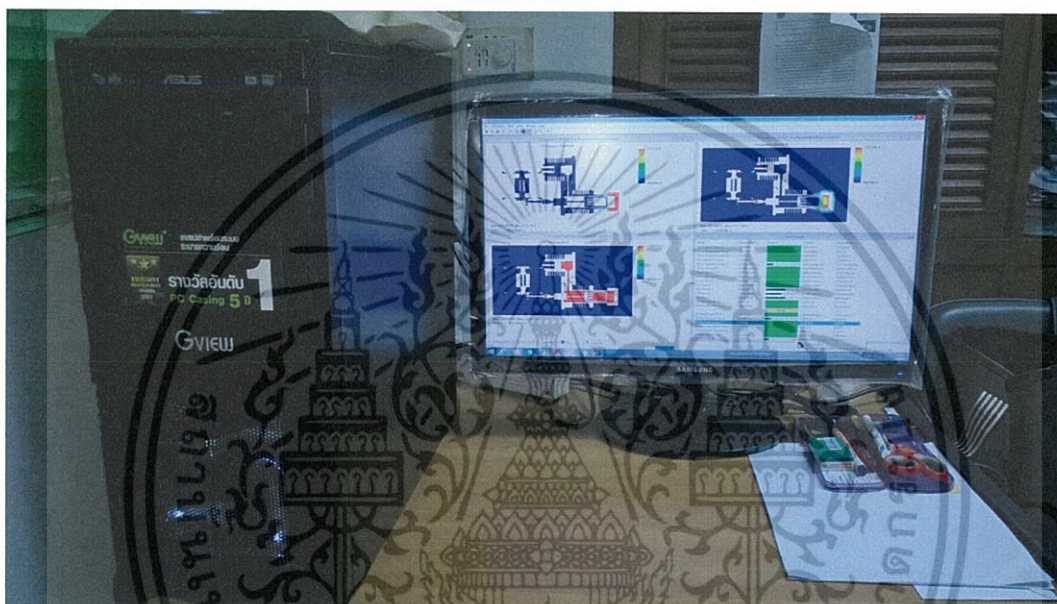
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นาฬิกาจับเวลา

นักศึกษาได้ใช้แอปพลิเคชันนาฬิกาจับเวลาสมาร์ตโฟนเพื่อใช้ในการจับเวลาจุดระเบิดและเวลาในการทำงานของเครื่องยนต์

- คอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้ในการเขียนแบบสามมิติและทำการวิเคราะห์การไหลของของไหลโดยมีคุณสมบัติของเครื่องดังนี้ ตัวประมวลผล Intel® Core(TM) i7-4790 CPU at 3.60 GHz การ์ดความจำ (RAM) ขนาด 24 GB ชนิดของระบบ 64 บิต ระบบปฏิบัติการ Windows 8.1 Pro



รูปที่ 3.167 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

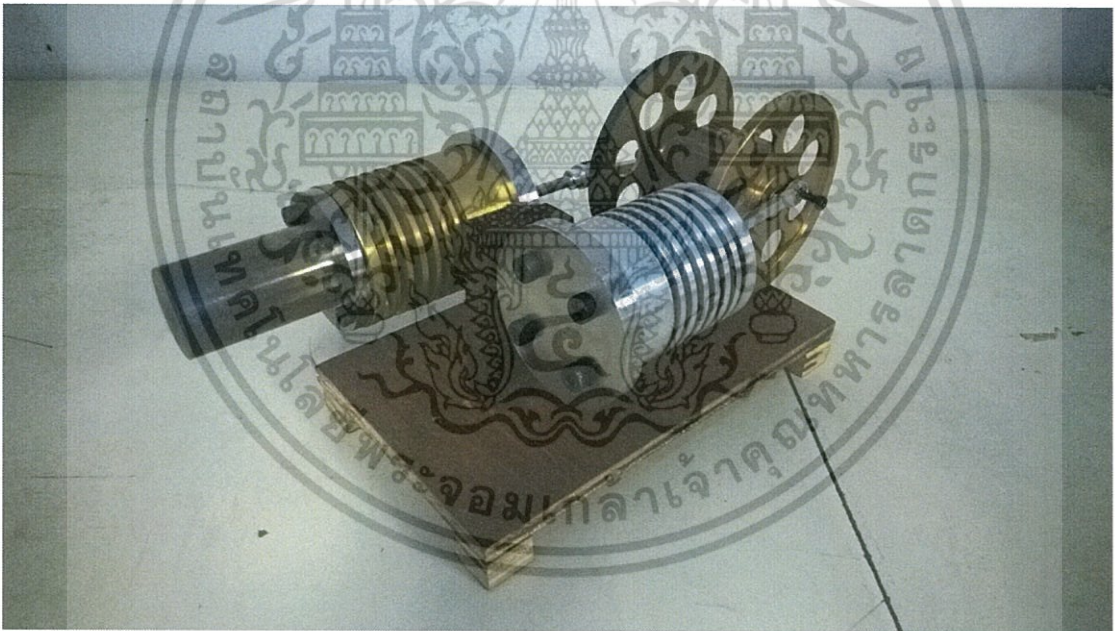
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในส่วนของการวิจัยจะแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ ผลจากการวัดค่าต่างๆเครื่องยนต์และผลการวิเคราะห์การไหลของจองไหลทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้โปรแกรม SolidWorks โดยผลจากการวัดค่าต่างๆของเครื่องยนต์จะถูกนำไปวิเคราะห์ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์และคุณสมบัติทางด้านความร้อนของเครื่องยนต์ ในส่วนของการวิเคราะห์การไหลของจองไหลทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้โปรแกรม SolidWorks จะทำงานวิเคราะห์ทั้ง อุณหภูมิและความดันของของไหลในกระบอกสูบ อุณหภูมิของโลหะ

4.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์

เมื่อทำการสร้างขึ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ จากนั้นนำมาประกอบจะได้เป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อย่นกำลังคู่ชนิดแกมมา ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถดูรายละเอียดและขนาดของชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ได้ในภาคผนวก



รูปที่ 4.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อย่นกำลังคู่ชนิดแกมมา

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์

อัตราส่วนกำลังอัด	2.5	
ของไหลทำงาน	อากาศ	
อุณหภูมิแหล่งความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	600	
วัสดุ	ฮีตเตอร์	เหล็กกล้าไร้สนิม
	กระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์	ทองเหลือง
	กระบอกสูบกำลัง	อะลูมิเนียม
	ลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์	แก้ว
	ลูกสูบกำลัง	แก้ว
	ล้อคุนกำลัง	ทองเหลือง
ปริมาตรตาย (cm^3)	กระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์(V_{DE})	6.3322
	กระบอกสูบลูกสูบกำลัง(V_{DC})	16.6259
ปริมาตรกวาด(cm^3)	กระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์(V_{SD})	9.5229
	กระบอกสูบลูกสูบกำลัง(V_{SP})	3.2035
ระยะชัก (cm)	2	
เวลาเริ่มต้นทำงาน (min)	4	
เวลาในการทำงาน (min)	40	
รอบการทำงานสูงสุด (RPM)	599.2	
กำลังขาออก (W)	0.7155	
ประสิทธิภาพทางความร้อน(%)	40.3098	

จากตารางที่ 4.1 แสดงถึงข้อมูลจำเพาะต่างๆที่ได้จากการวัดประสิทธิภาพขณะทำงานของเครื่องยนต์ ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสพบว่าเครื่องยนต์มีเวลาเริ่มต้นทำงานเท่ากับ 4 นาที โดยมีเวลาการทำงานสูงสุด 40 นาที ที่รอบสูงสุด 599 รอบต่อนาทีที่สามารถคำนวณกำลังขาออกของเครื่องยนต์ได้ 0.7155 วัตต์ และประสิทธิภาพทางความร้อน 40.3098 เปอร์เซ็นต์

4.1.1 ผลการทำงานของเครื่องยนต์

ในการวัดผลการทำงานของเครื่องยนต์นักศึกษาได้ใช้ตะเกียงแอลกอฮอล์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน โดยทำการวัดอุณหภูมิของกระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์และกำลัง และวัดรอบของเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส ผลการทำงานของเครื่องยนต์แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์

Working time	Temperature (K)		Speed round (RPM)
	Displacer cylinder	Power cylinder	
0:00:00	445.3	301.7	522.9
0:00:10	446.5	301.7	523.9
0:00:20	447.8	301.7	524.2
0:00:30	449.2	301.7	527.6
0:00:40	450.5	301.7	530.7
0:00:50	451.7	301.8	531.8
0:01:00	453.0	301.8	531.9
0:01:10	454.3	301.8	529.4
0:01:20	455.5	301.8	524.4
0:01:30	456.8	301.9	526.8
0:01:40	458.0	301.9	527.2
0:01:50	459.2	302.0	532.4
0:02:00	460.5	302.0	531
0:02:10	461.6	302.0	538.4
0:02:20	462.8	302.1	540.4
0:02:30	464.0	302.1	545.7
0:02:40	465.3	302.1	553.8
0:02:50	466.6	302.2	546.3
0:03:00	467.8	302.2	546.6
0:03:10	469.2	302.3	542.4
0:03:20	470.3	302.4	547
0:03:30	471.6	302.4	548.2

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์

Working time	Temperature (K)		Speed round (RPM)
	Displacer cylinder	Power cylinder	
0:03:40	472.8	302.5	543.1
0:03:50	474.1	302.5	544.4
0:04:00	475.4	302.6	549.7
0:04:10	476.6	302.7	550.1
0:04:20	477.7	302.7	552
0:04:30	478.7	302.8	549.1
0:04:40	479.9	302.9	559.2
0:04:50	481.0	303.0	566.4
0:05:00	482.0	303.0	559.5
0:05:10	483.1	303.1	550.4
0:05:20	484.2	303.2	556.2
0:05:30	485.4	303.3	559.9
0:05:40	486.5	303.4	555
0:05:50	487.5	303.4	559.2
0:06:00	488.5	303.5	548.1
0:06:10	489.6	303.6	538.7
0:06:20	490.6	303.7	541.6
0:06:30	491.7	303.8	544.3
0:06:40	492.8	303.9	544.8
0:06:50	493.7	304.0	554.8
0:07:00	494.7	304.1	561.8
0:07:10	495.6	304.2	570.6
0:07:20	496.7	304.3	569.2
0:07:30	497.7	304.4	572.5
0:07:40	498.8	304.5	559.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์

Working time	Temperature (K)		Speed round (RPM)
	Displacer cylinder	Power cylinder	
0:07:50	499.9	304.6	536.4
0:08:00	500.7	304.7	540.5
0:08:10	501.4	304.8	550.3
0:08:20	502.2	305.0	537.8
0:08:30	503.1	305.1	531.8
0:08:40	503.9	305.2	529.4
0:08:50	504.6	305.3	517.4
0:09:00	505.3	305.4	496.5
0:09:10	506.0	305.5	489
0:09:20	506.6	305.6	496.6
0:09:30	507.3	305.7	527
0:09:40	508.0	305.9	530.1
0:09:50	508.9	306.0	537.3
0:10:00	509.7	306.1	551.5
0:10:10	510.5	306.2	524.1
0:10:20	511.2	306.4	534.4
0:10:30	511.9	306.5	580.4
0:10:40	512.5	306.6	598
0:10:50	513.2	306.7	597.1
0:11:00	513.9	306.8	599.2
0:11:10	514.5	307.0	593.3
0:11:20	515.1	307.1	590.2
0:11:30	515.9	307.2	589.1
0:11:40	516.7	307.4	586.1
0:11:50	517.5	307.5	580

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์

Working time	Temperature (K)		Speed round (RPM)
	Displacer cylinder	Power cylinder	
0:12:00	518.3	307.6	580.3
0:12:10	518.9	307.8	583.7
0:12:20	519.5	307.9	582.2
0:12:30	520.1	308.1	585.3
0:12:40	520.6	308.2	581.1
0:12:50	521.2	308.3	564.6
0:13:00	522.0	308.5	569.4
0:13:10	522.8	308.6	570.4
0:13:20	523.4	308.8	571.8
0:13:30	523.9	308.9	566.6
0:13:40	524.4	309.0	569.5
0:13:50	525.0	309.2	564.4
0:14:00	525.5	309.3	568.2
0:14:10	526.0	309.5	562
0:14:20	526.6	309.6	556.3
0:14:30	527.3	309.8	553.6
0:14:40	527.7	309.9	560.6
0:14:50	528.1	310.0	558.4
0:15:00	528.6	310.2	563.3
0:15:10	529.3	310.3	558
0:15:20	530.0	310.5	557.7
0:15:30	530.6	310.6	558.2
0:15:40	531.2	310.8	540.4
0:15:50	531.8	310.9	529.4
0:16:00	532.5	311.1	533.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์

Working time	Temperature (K)		Speed round (RPM)
	Displacer cylinder	Power cylinder	
0:16:10	533.2	311.2	536.3
0:16:20	533.9	311.4	540.4
0:16:30	534.6	311.6	536.2
0:16:40	535.1	311.7	521.3
0:16:50	535.3	311.8	518.9
0:17:00	535.6	312.0	505.1
0:17:10	536.0	312.1	523.5
0:17:20	536.4	312.3	533.7
0:17:30	536.9	312.5	548.5
0:17:40	537.3	312.6	556.7
0:17:50	537.7	312.7	555.5
0:18:00	538.2	312.9	546
0:18:10	538.7	313.0	534.5
0:18:20	539.1	313.1	528.8
0:18:30	539.3	313.3	534.0
0:18:40	539.5	313.4	545.0
0:18:50	539.6	313.5	552.2
0:19:00	539.9	313.7	546.9
0:19:10	540.3	313.8	547.9
0:19:20	540.6	313.9	547.9
0:19:30	541.0	314.1	548.4
0:19:40	541.4	314.2	545.4
0:19:50	542.1	314.4	539.9
0:20:00	542.7	314.5	530.0
0:20:10	543.4	314.7	528.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์

Working time	Temperature (K)		Speed round (RPM)
	Displacer cylinder	Power cylinder	
0:20:20	544.0	314.8	537.5
0:20:30	544.5	315.0	534.9
0:20:40	545.0	315.1	537.2
0:20:50	545.1	315.2	535.6
0:21:00	545.3	315.4	532.1
0:21:10	545.4	315.5	528.5
0:21:20	545.5	315.7	528.9
0:21:30	545.7	315.8	529.7
0:21:40	545.7	315.9	533.3
0:21:50	545.7	316.1	533.1
0:22:00	545.8	316.2	536.8
0:22:10	546.0	316.3	531.5
0:22:20	546.2	316.5	531.3
0:22:30	546.4	316.6	525.4
0:22:40	546.8	316.7	517.8
0:22:50	547.3	316.9	510
0:23:00	548.0	317.0	499.6
0:23:10	548.8	317.2	505.8
0:23:20	549.1	317.4	522.5
0:23:30	549.6	317.5	524.2
0:23:40	550.4	317.7	527.4
0:23:50	551.2	317.8	528.6
0:24:00	551.8	318.0	517.1
0:24:10	552.4	318.2	494.9
0:24:20	552.9	318.3	491.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์

Working time	Temperature (K)		Speed round (RPM)
	Displacer cylinder	Power cylinder	
0:24:30	553.4	318.4	481.5
0:24:40	553.5	318.6	471.9
0:24:50	553.7	318.7	459.4
0:25:00	553.9	318.8	437.7
0:25:10	554.1	319.0	549
0:25:20	554.3	319.1	500.2
0:25:30	554.3	319.2	510.4
0:25:40	553.8	319.3	495.6
0:25:50	553.6	319.5	460.7
0:26:00	553.6	319.6	485.5
0:26:10	553.4	319.7	521.5
0:26:20	553.0	319.9	508.6
0:26:30	553.0	320.0	509.1
0:26:40	552.7	320.2	504.1
0:26:50	552.4	320.3	540.7
0:27:00	552.2	320.4	559.6
0:27:10	552.0	320.5	548.5
0:27:20	552.1	320.6	562.4
0:27:30	552.2	320.7	555.5
0:27:40	552.3	320.8	559.4
0:27:50	552.4	320.9	554.8
0:28:00	552.3	321.0	553.4
0:28:10	552.4	321.2	530.5
0:28:20	552.7	321.3	524.6
0:28:30	552.8	321.4	519.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงอุณหภูมิของกระบอกสูบและรอบการทำงานของเครื่องยนต์

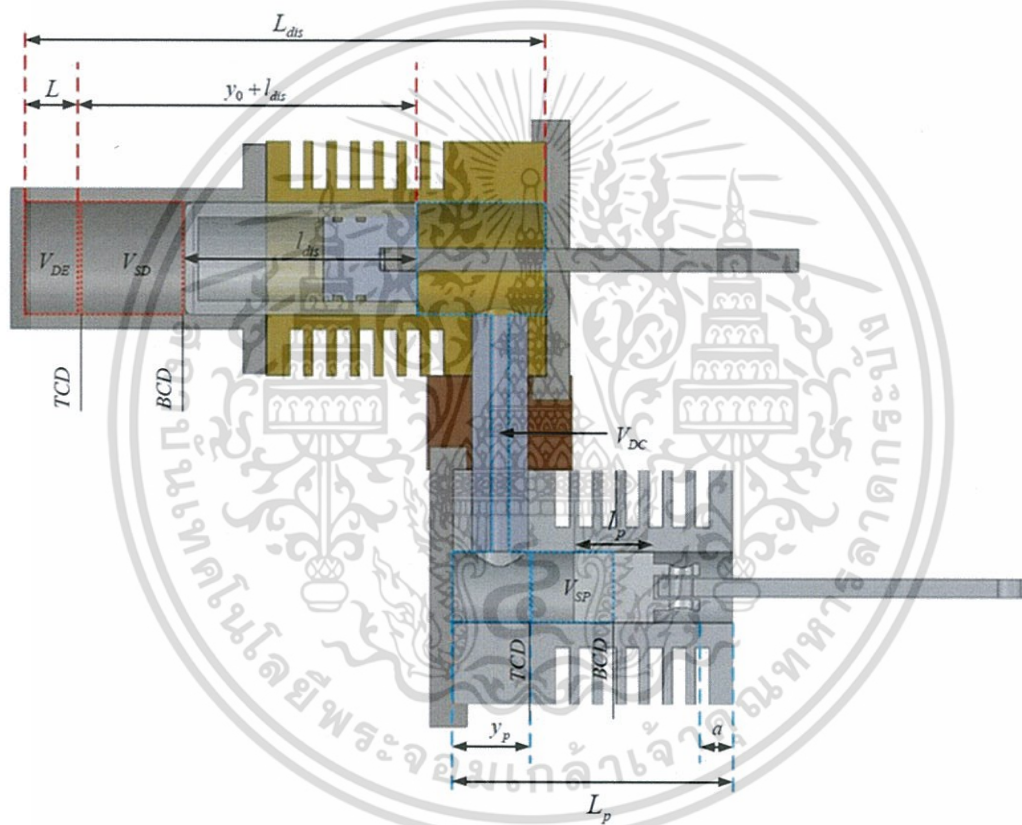
Working time	Temperature (K)		Speed round (RPM)
	Displacer cylinder	Power cylinder	
0:24:30	553.4	318.4	481.5
0:28:40	552.7	321.6	526.5
0:28:50	552.3	321.7	520.8
0:29:00	552.1	321.8	524.5
0:29:10	552.1	322.0	534.9
0:29:20	551.8	322.1	553.4
0:29:30	551.7	322.2	561.5
0:29:40	551.7	322.3	552.1
0:29:50	551.6	322.4	538.5
0:30:00	551.7	322.6	534.6
0:30:10	552.0	322.7	539.4
0:30:20	552.4	322.7	535
0:30:30	552.6	322.8	528.6
0:30:40	552.6	322.9	527.5
0:30:50	552.4	322.9	514.1
0:31:00	552.1	323.0	519.4
0:31:10	551.9	323.2	517.8
0:31:20	551.7	323.3	517.4
0:31:30	551.3	323.3	515.5
0:31:40	551.1	323.4	494.5
0:31:50	551.2	323.5	486.4
0:32:00	551.1	323.5	469.7
0:32:10	550.7	323.7	449.2
0:32:20	550.5	323.8	438.6
0:32:30	550.7	323.8	405.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบเครื่องยนต์พบว่าเครื่องยนต์มีเวลาจุดระเบิด (ignition time) เท่ากับ 4 นาที และมีเวลาทำงานที่นานที่สุดเท่ากับ 40 นาที โดยตารางที่ 4.2 พบว่าเครื่องยนต์มีรอบการทำงานสูงที่สุดที่ 345.2 รอบต่อนาทีที่สามารถวัดค่าอุณหภูมิของกระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์ได้เท่ากับ 513.9 เคลวิน และอุณหภูมิกระบอกสูบกำลังมีค่า 306.8 เคลวิน โดยมีเวลาการทำงานขณะทดสอบ 30 นาที ในการกระตุ้นครั้งที่สอง

4.1.2 การวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์

เครื่องยนต์ที่ผลิตออกมาสามารถวัดระยะของลูกสูบได้ มิลลิเมตร โดยสามารถคำนวณค่าปริมาตรต่างๆของเครื่องยนต์ได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงปริมาตรและระยะต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

คำนวณปริมาตรตายของปริมาตรขยาย (V_{DE}) จากสมการ

$$V_{DE} = \frac{\pi D_{dis}^2 L}{4}$$

$$= \frac{\pi (25\text{mm})^2 (12.93)}{4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 = 6,332.2726 mm³ = 6.3322 cm³
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณปริมาตรกวาดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (V_{SD}) จากสมการ

$$\begin{aligned} V_{SD} &= \frac{\pi D_{dis}^2 y_0}{4} \\ &= \frac{\pi (25mm)^2 (19.4mm)}{4} \\ &= 9,522.9527 \text{ mm}^3 = 9.5229 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

คำนวณปริมาตรตายของปริมาตรบีบอัด (V_{DC}) จากสมการ

$$\begin{aligned} V_{DC} &= \frac{1}{4} (\pi D_{dis}^2 [L_{dis} - (L + y_0 + l_{dis})] + \pi D_p^2 [L_p - (l_p + y_p + a)]) \\ &= \frac{1}{4} (\pi (25mm)^2 [110.8mm - (12.9 + 19.4 + 50.5)mm]) + \\ &\quad (\pi (14.5mm) [61mm - (15.4 + 17.8 + 10.35)mm])^2 \\ &= 16,625.98573 \text{ mm}^3 = 16.6259 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

คำนวณปริมาตรกวาดของกระบอกสูบกำลัง (V_{SP}) จากสมการ

$$\begin{aligned} V_{SP} &= \frac{\pi D_p^2 y_0}{4} \\ &= \frac{\pi (14.5mm)^2 (19.4mm)}{4} \\ &= 3,203.5212 \text{ mm}^3 = 3.2035 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคำนวณปริมาตรต่างๆในเครื่องยนต์จะสามารถนำค่าปริมาตรต่างๆที่ได้มาคำนวณหาค่า ปริมาตรขยาย ปริมาตรบีบอัด และปริมาตรรวมของเครื่องยนต์ได้ดังนี้
คำนวณปริมาตรขยายของเครื่องยนต์ (V_E) ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} V_E &= \frac{V_{SD}}{2}(1 - \cos \theta) + V_{DE} \\ &= \frac{9.5529 \text{ cm}^3}{2}(1 - \cos 0^\circ) + 6.3322 \text{ cm}^3 \\ &= 6,332.2726 \text{ mm}^3 = 6.3322 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

คำนวณค่าปริมาตรบีบอัดของเครื่องยนต์ (V_C) ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} V_C &= \frac{V_{SD}}{2}[1 + \cos \theta] + \frac{V_{SP}}{2}[1 - \cos(\theta - \varphi)] + V_{DC} \\ &= \frac{9.5529 \text{ cm}^3}{2}[1 + \cos(0^\circ)] + \frac{3.2035 \text{ cm}^3}{4}[1 - \cos(0^\circ - 90^\circ)] + 16.6259 \text{ cm}^3 \\ &= 27,750.6990 \text{ mm}^3 = 27.7506 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

ผลรวมของปริมาตรทั้งหมดในเครื่องยนต์ (V) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} V &= V_E + V_C \\ &= 6.3322 \text{ cm}^3 + 27.7506 \text{ cm}^3 = 34.0829 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

จากนั้นนำสมการข้างต้นมาวิเคราะห์หาปริมาตรขยาย ปริมาตรบีบอัดและปริมาตรรวมของเครื่องยนต์ที่มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ จะได้ค่าดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงปริมาตรของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ

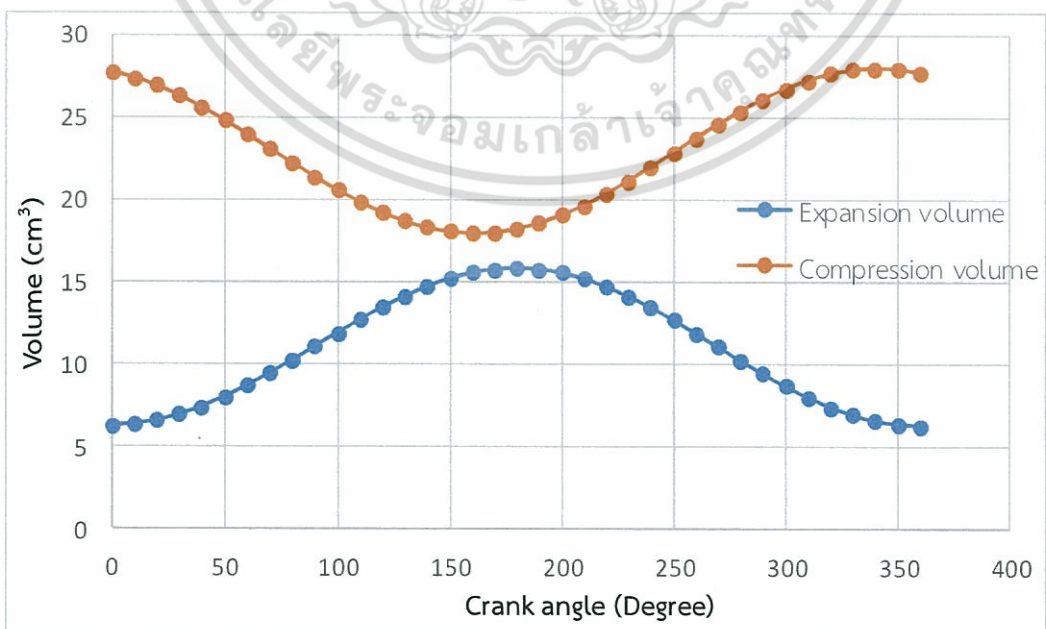
Crank angle (degree)	Expansion volume (Cm ³)	Compression volume (Cm ³)	Total volume (Cm ³)
0	6.3323	27.7507	34.0830
10	6.4046	27.4002	33.8048
20	6.6194	26.9157	33.5351
30	6.9702	26.3119	33.2821
40	7.4462	25.6071	33.0534
50	8.0331	24.8228	32.8560
60	8.7130	23.9828	32.6958
70	9.4652	23.1126	32.5778
80	10.2669	22.2386	32.5055
90	11.0937	21.3875	32.4812
100	11.9206	20.5850	32.5055
110	12.7223	19.8555	32.5778
120	13.4745	19.2213	32.6958
130	14.1544	18.7016	32.8560
140	14.7413	18.3121	33.0534
150	15.2173	18.0648	33.2821
160	15.5681	17.9671	33.5351
170	15.7829	18.0219	33.8048
180	15.8552	18.2277	34.0830
190	15.7829	18.5782	34.3611
200	15.5681	19.0627	34.6308
210	15.2173	19.6665	34.8839
220	14.7413	20.3713	35.1126
230	14.1544	21.1556	35.3100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

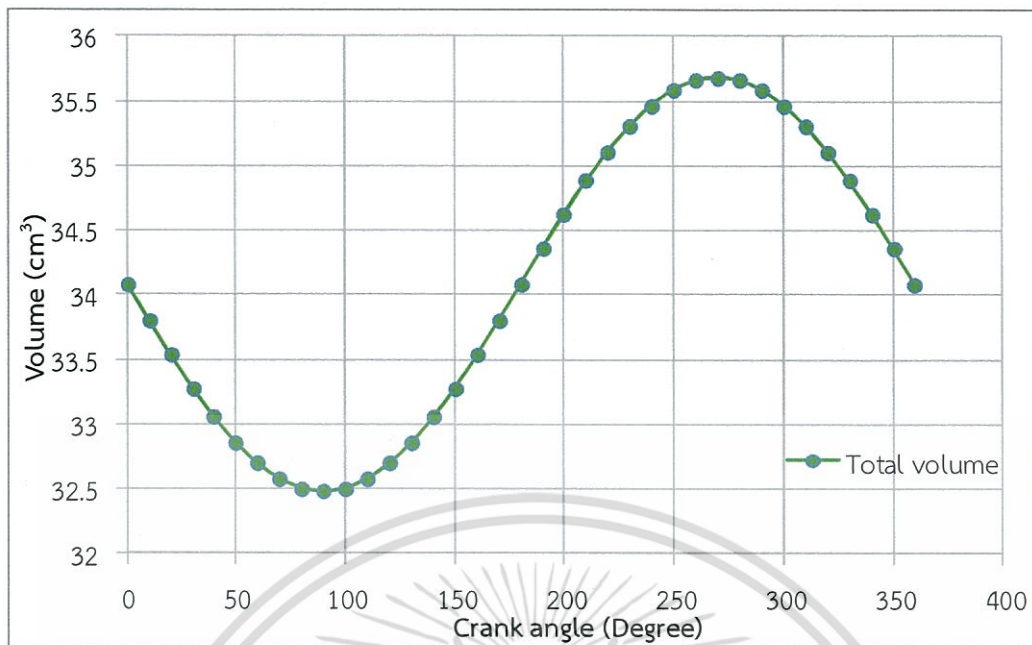
ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ตารางแสดงปริมาตรของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ

Crank angle (degree)	Expansion volume (Cm ³)	Compression volume (Cm ³)	Total volume (Cm ³)
240	13.4745	21.9956	35.4701
250	12.7223	22.8659	35.5881
260	11.9206	23.7398	35.6604
270	11.0937	24.5910	35.6847
280	10.2669	25.3935	35.6604
290	9.4652	26.1229	35.5881
300	8.7130	26.7571	35.4701
310	8.0331	27.2769	35.3100
320	7.4462	27.6663	35.1126
330	6.9702	27.9137	34.8839
340	6.6194	28.0114	34.6308
350	6.4046	27.9565	34.3611
360	6.3323	27.7507	34.0830

จากข้อมูลของตารางที่ 4.2 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรขยายและปริมาตรบีบอัดกับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรวมของเครื่องยนต์กับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรขยายและปริมาตรบีบอัดกับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์
 แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรวมกับมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าปริมาตรบีบอัดมีค่าที่มากกว่าปริมาตรขยายจึงทำให้กราฟทั้งสองไม่ตัดกัน ซึ่งสาเหตุมาจากการออกแบบความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ที่น้อยไป ทำให้ปริมาตรบีบอัดมีค่ามากขึ้น ส่วนในรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่าปริมาตรรวมต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่มุมข้อเหวี่ยงที่ 90 องศาและ 270 องศา ซึ่งเป็นมุมจุดตัดของปริมาตรขยายและปริมาตรบีบอัดที่เหมาะสม ซึ่งปริมาตรรวมสูงสุดของเครื่องยนต์อยู่ที่ 35.6847 cm³

เมื่อทำการคำนวณปริมาตรต่างๆภายในเครื่องยนต์รวมกับข้อมูลของอุณหภูมิของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และกระบอกสูบกำลังขณะเครื่องยนต์มีรอบการทำงานสูงสุด จะสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาความดันภายในกระบอกสูบเพื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบกับปริมาตรขยาย

ตารางที่ 4.4 ปริมาตรภายในเครื่องยนต์และอุณหภูมิของกระบอกสูบที่รอบการทำงานสูงสุด

ปริมาตรตายของปริมาตรขยาย (V_{DE})	6.3322 cm ³
ปริมาตรกวาดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (V_{SD})	9.5229 cm ³
ปริมาตรตายของปริมาตรบีบอัด (V_{DC})	16.6259 cm ³
ปริมาตรกวาดของกระบอกสูบกำลัง (V_{SP})	3.2035 cm ³
อุณหภูมิกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์	381.65 K
อุณหภูมิกระบอกสูบกำลัง	306.75 K

สามารถหาค่าอัตราส่วนกำลังอัดได้จากสมการ

$$\begin{aligned}\xi &= 1 + (V_{SD} / V_{DE}) \\ &= 1 + \left(\frac{9.5229 \text{ cm}^3}{6.3322 \text{ cm}^3} \right) \\ &= 2.5038\end{aligned}$$

สามารถหาค่า λ และมุม δ เพื่อใช้คำนวณความดันภายในกระบอกสูบได้ดังนี้
หาอัตราส่วนของอุณหภูมิ (λ) ได้จากสมการ

$$\gamma = \frac{T_C}{T_H} = \frac{306.8 \text{ K}}{513.9 \text{ K}} = 0.5696$$

หาอัตราส่วนของปริมาตรกวาด (χ_s) ได้จากสมการ

$$\chi_s = \frac{V_{SP}'}{V_{SD}} = \frac{9.5229 \text{ cm}^3 + 3.2035 \text{ cm}^3}{9.5229 \text{ cm}^3} = 1.3364$$

หาอัตราส่วนปริมาตรตายของปริมาตรขยาย (ν) ได้จากสมการ

$$\nu = \frac{V_{DE}}{V_{SD}} = \frac{6.3322 \text{ cm}^3}{9.5229 \text{ cm}^3} = 0.6649$$

หาอัตราส่วนปริมาตรตายของปริมาตรบีบอัด (ζ) ได้จากสมการ

$$\zeta = \frac{V_{DC}}{V_{SD}} = \frac{16.6259 \text{ cm}^3}{9.5229 \text{ cm}^3} = 1.7459$$

หาค่า A ได้จากสมการ

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

$$A = \sqrt{(0.5696)^2 + [2 \times (0.5696 - 1) \times 1.3364] \times \cos(90^\circ) + (1.3364)^2 - (2 \times 0.5696) + 1}$$

$$A = 1.3959$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า B ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} B &= (\gamma + 2\gamma\nu + \chi_s + 2c + 1) \\ &= (0.5696) + (2 \times 0.5696 \times 0.6649) + 1.3364 + (2 \times 1.7459) + 1 \\ &= 7.2190 \end{aligned}$$

สามารถคำนวณค่า λ ได้จากสมการ

$$\lambda = \frac{A}{B} = \frac{1.3959}{7.2190} = 0.1934$$

สามารถคำนวณหาค่า δ ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \delta &= \tan^{-1} \left(\frac{\chi_s \sin \phi}{\gamma + \cos \phi + 1} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{(1.3364) \sin(90^\circ)}{0.5696 + \cos(90^\circ) + 1} \right) \\ &= 39.9250^\circ \end{aligned}$$

ดังนั้นที่มุมข้อเหวี่ยงเท่ากับ 0° จะสามารถหาความดันภายในเครื่องยนต์ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} P &= \frac{P_{mean} \sqrt{1 - \lambda^2}}{1 - \lambda \cdot \cos(\theta - \delta)} \\ &= \frac{101.3 \times 10^3 \sqrt{1 - (0.1934)^2}}{1 - 0.1934 \cos(0^\circ - 39.9250^\circ)} \\ &= 116.6916 \text{ kPa} \end{aligned}$$

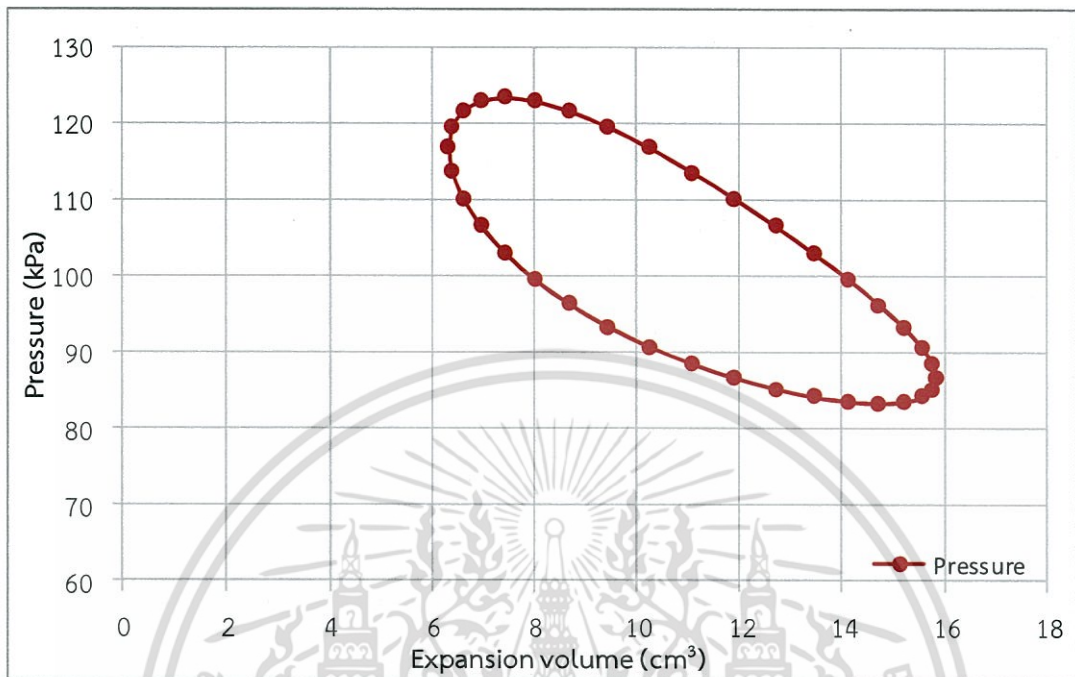
จากนั้นทำการหาความดันภายในที่ค่ามุมข้อเหวี่ยงต่างๆจะได้ค่าดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความดันภายในในระบบและปริมาตรขยายที่ค่ามุมข้อเหวี่ยงต่างๆ

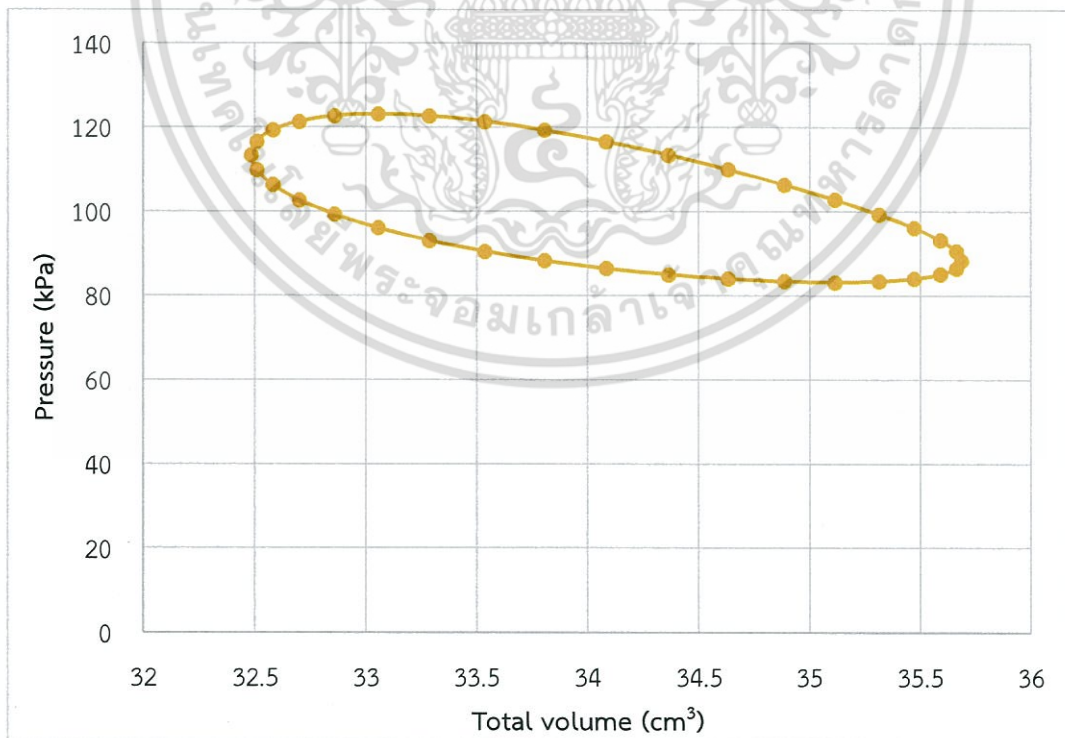
Crank angle (degree)	Total volume (Cm ³)	Pressure (kPa)	Crank angle (degree)	Total volume (Cm ³)	Pressure (kPa)
0	34.0830	116.6916	190	34.3611	85.1234
10	33.8048	119.3966	200	34.6308	84.1003
20	33.5351	121.4693	210	34.8839	83.4871
30	33.2821	122.7719	220	35.1126	83.2846
40	33.0534	123.2123	230	35.3100	83.4932
50	32.8560	122.7585	240	35.4701	84.1127
60	32.6958	121.4436	250	35.5881	85.1419
70	32.5778	119.3603	260	35.6604	86.5784
80	32.5055	116.6471	270	35.6847	88.4164
90	32.4812	113.4691	280	35.6604	90.6448
100	32.5055	109.9987	290	35.5881	93.2441
110	32.5778	106.3994	300	35.4701	96.1828
120	32.6958	102.8148	310	35.3100	99.4135
130	32.8560	99.3632	320	35.1126	102.8679
140	33.0534	96.1365	330	34.8839	106.4536
150	33.2821	93.2025	340	34.6308	110.0521
160	33.5351	90.6086	350	34.3611	113.5194
170	33.8048	88.3859	360	34.0830	116.6917
180	34.0830	86.5539			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในเครื่องยนต์กับปริมาตรขยายได้ดังนี้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในเครื่องยนต์ปริมาตรขยาย



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในเครื่องยนต์ปริมาตรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลทำงาน (W_E) สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} W_E &= \oint PdV_E = \frac{p_{mean} V_{SD} \pi \lambda \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - \lambda^2}} \\ &= \left(\frac{(101.3 \times 10^3 \text{ Pa})(9.5229 \text{ cm}^3) \times \pi \times 0.1934 \times \sin(36.9250^\circ)}{1 + \sqrt{1 - (0.1934)^2}} \right) \\ &= 17.7738 \times 10^{-2} \text{ J} \end{aligned}$$

งานที่เกิดจากการอัดตัวของของไหลทำงาน (W_C) สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} W_C &= \oint PdV_C = -\frac{p_{mean} V_{SD} \pi \lambda \gamma \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - \lambda^2}} \\ &= -\left(\frac{(101.3 \times 10^3 \text{ Pa})(9.5229 \text{ cm}^3) \times \pi \times 0.1934 \times 0.5969 \times \sin(36.9250^\circ)}{1 + \sqrt{1 - (0.1934)^2}} \right) \\ &= -10.6092 \times 10^{-2} \text{ J} \end{aligned}$$

งานในหนึ่งรอบวัฏจักร (W_i) สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} W_i &= W_E + W_C \\ &= (17.7738 \times 10^{-2}) + (-10.6092 \times 10^{-2}) \\ &= 7.1646 \times 10^{-2} \text{ J} \end{aligned}$$

รอบสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ 345.20 รอบต่อนาที กำลังขาออกของเครื่องยนต์ (P_i) หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} P_i &= W_i \times N \\ &= \frac{(7.1646 \times 10^{-2} \text{ J})(599.2 \text{ RPM})}{60 \text{ s}} \\ &= 0.7155 \text{ W} \end{aligned}$$

ดังนั้นกำลังขาออกของเครื่องยนต์มีค่าเท่ากับ 715.5 มิลลิวัตต์

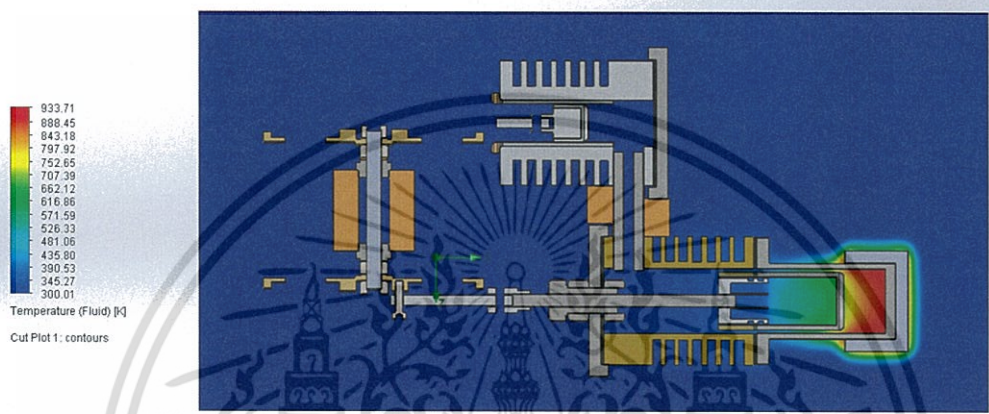
ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ (η) สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W_i}{W_E} \times 100\% \\ &= \frac{7.1646 \times 10^{-2} \text{ J}}{17.7738 \times 10^{-2} \text{ J}} \times 100\% = 40.3098\% \end{aligned}$$

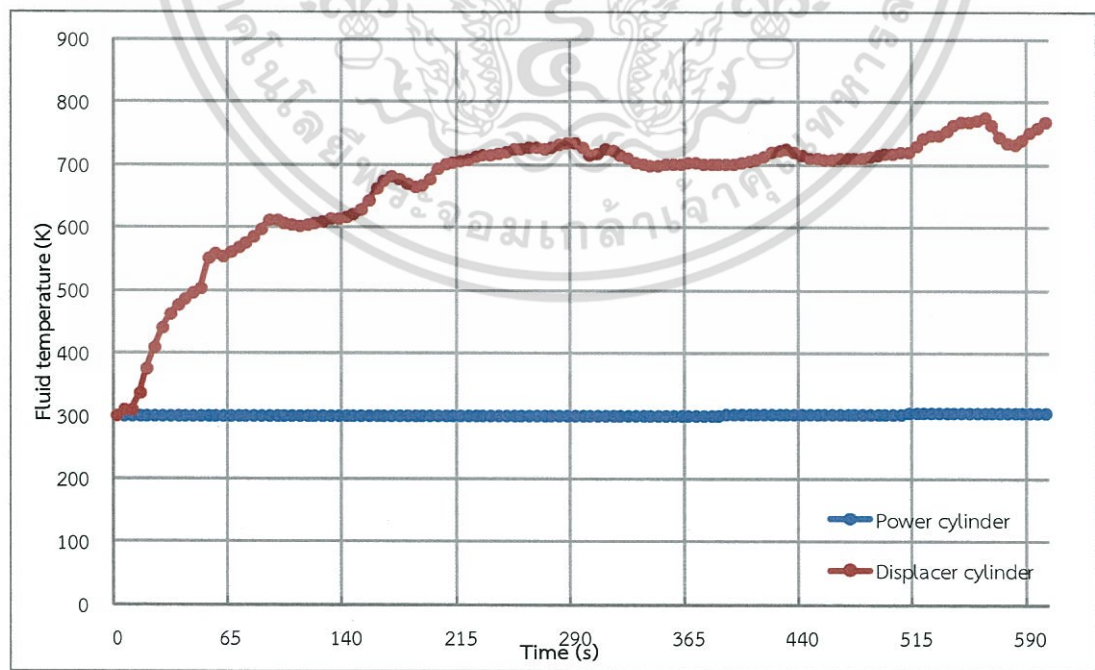
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์ของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ในการวิเคราะห์ของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อศึกษาอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์ เนื่องจากในการวัดอุณหภูมิเพื่อวิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์นั้นไม่สามารถวัดอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์ได้โดยตรง จึงต้องอาศัยการวิเคราะห์ของไหลทำงานของเครื่องยนต์โดยโปรแกรม SolidWorks เข้ามาช่วยในการศึกษาอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์ โดยมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบริเวณที่วัดอุณหภูมิผิวของโลหะกับเวลาที่ใช้ในการ

วิเคราะห์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อได้รับความร้อนจากตะเกียงแอลกอฮอล์เป็นเวลา 600 วินาที ซึ่งพบว่าอากาศในเครื่องยนต์บริเวณปลายของฮีตเตอร์มีอุณหภูมิสูงถึง 900 เคลวิน ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศบริเวณกระบอกสูบกำลังมีอุณหภูมิเพียง 300 เคลวิน โดยสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบริเวณที่วัดอุณหภูมิผิวของโลหะกับเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.8 โดยพบว่าที่เวลาที่เครื่องยนต์เริ่มทำงานนั้นคือ 2.30 นาที หรือ 150 วินาที สามารถวัดอุณหภูมิของอากาศของกระบอกสูบดีสเพลสเซอร์และกระบอกสูบกำลังได้ 629 เคลวิน และ 300 เคลวิน ตามลำดับซึ่งพบว่ามีค่าความต่างอุณหภูมิของกระบอกสูบทั้งสองที่ 329 เคลวิน โดยความต่างอุณหภูมินี้เป็นค่าความต่างอุณหภูมิน้อยที่สุดที่ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงาน



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลของงานวิจัยเรื่องการออกแบบและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงล้อตุ่นกำลังคู่ชนิดแกมมา โดยใช้หลักผลต่างอุณหภูมิระหว่างกระบอกสูบทั้งสองฝั่ง ในการออกแบบกระบอกสูบใช้หลักผลต่างอุณหภูมิระหว่างกระบอกสูบโดยการใช้ทองเหลืองทำเป็นกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และใช้อลูมิเนียมทำเป็นกระบอกสูบกำลัง ส่วนปริมาตรภายในเครื่องยนต์ใช้หลักอัตราส่วนกำลังอัดในการออกแบบ โดยกำหนดให้ค่าอัตราส่วนกำลังอัดมีค่าเท่ากับ 2.5

ปริมาตรตายของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (V_{DE}) มีค่า 6.3322 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรตายของกระบอกสูบลูกสูบกำลัง (V_{DC}) มีค่า 16.6259 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรกวาดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (V_{SD}) มีค่า 9.5229 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรกวาดของกระบอกสูบกำลัง (V_{SP}) มีค่า 3.2035 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรขยายของเครื่องยนต์ (V_E) มีค่า 6.3322 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรบีบอัดของเครื่องยนต์ (V_C) มีค่า 27.7506 ลูกบาศก์เซนติเมตร และปริมาตรทั้งหมดในเครื่องยนต์ (V) มีค่า 34.0829 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากรูปที่ 4.3 สรุปได้ว่าปริมาตรบีบอัดมีค่าที่มากกว่าปริมาตรขยายจึงทำให้กราฟทั้งสองไม่ตัดกัน ซึ่งสาเหตุมาจากการออกแบบความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ที่น้อยไป ทำให้ปริมาตรบีบอัดมีค่ามากขึ้นและจากรูปที่ 4.4 ปริมาตรรวมต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่มุมข้อเหวี่ยงที่ 90 องศาและ 270 องศาตามลำดับ ซึ่งเป็นมุมจุดตัดของปริมาตรขยายและปริมาตรบีบอัดที่เหมาะสม โดยปริมาตรรวมสูงสุดของเครื่องยนต์อยู่ที่ 35.6847 ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าอัตราส่วนกำลังอัดเท่ากับ 2.5038

เครื่องยนต์ใช้ตะเกียงแอลกอฮอล์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน โดยทำการวัดอุณหภูมิของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และกำลังและวัดรอบการทำงานของเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องยนต์มีเวลาเริ่มต้นทำงาน (Initial time) เท่ากับ 2.30 นาทีและมีเวลาทำงานที่นานที่สุดเท่ากับ 40 นาที ที่รอบรอบการทำงานสูงที่สุดที่ 599 รอบต่อนาที อุณหภูมิของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์เท่ากับ 513.9 เคลวินและอุณหภูมิกระบอกสูบกำลังมีค่า 306.8 เคลวิน กำลังขาออกของเครื่องยนต์มีค่าเท่ากับ 715.5 มิลลิวัตต์ และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ (η) เท่ากับ 40.3098 %

ผลการวิเคราะห์ของไหลทำงานภายในเครื่องยนต์แสดงถึงอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์โดยพบว่าที่เวลาเริ่มต้นทำงานของเครื่องยนต์ที่ 2.30 นาที พบว่าอุณหภูมิของอากาศภายในกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และกระบอกสูบกำลังมีค่า 621 เคลวิน และ 300 เคลวิน ตามลำดับ ความต่างอุณหภูมิของกระบอกสูบทั้งสองเท่ากับ 321 เคลวิน ซึ่งเป็นความต่างอุณหภูมิน้อยที่สุดที่ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเริ่มทำงานนั่นเอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำงานและแก้ไขเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผู้จัดทำมีข้อแนะนำดังต่อไปนี้

- 1) เนื่องจากอะลูมิเนียมถึงแม้จะนำความร้อนได้ดีกว่าทองเหลืองแต่มีข้อเสียคือมีการขยายตัวเชิงเส้นที่มากกว่า จึงทำให้เมื่อได้รับความร้อนมากเกลียวอาจจะเสื่อมสภาพลงทำให้มีอากาศรั่วได้มากขึ้นจึงแนะนำให้ใช้ทองเหลืองในการทำกระบอกสูบกำลังตามเดิม
- 2) ในการประกอบล้อตุนกำลัง ควรให้ล้อตรงและแน่น เมื่อทำการหมุนล้อไม่ควรแกว่งไปมา และควรหมุนได้อย่างน้อย 5 วินาที
- 3) พยายามลดแรงเสียดทานให้น้อยที่สุดเช่น ใช้ลูกปืนลดการเสียดสีบริเวณแกนล้อ ชัดผิวด้านในของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ให้ลื่นที่สุดและลดน้ำหนักของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ให้น้อยที่สุด
- 4) ในการประกอบกระบอกสูบควรระวังเครื่องอากาศที่อาจรั่วไหลได้
- 5) เมื่อประกอบเครื่องเสร็จควรใช้การเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์ควรเคลื่อนที่อย่างลื่นไหล ล้อไม่แกว่งไปมาและมีเสียงที่เกิดจากการเสียดสีน้อยที่สุด

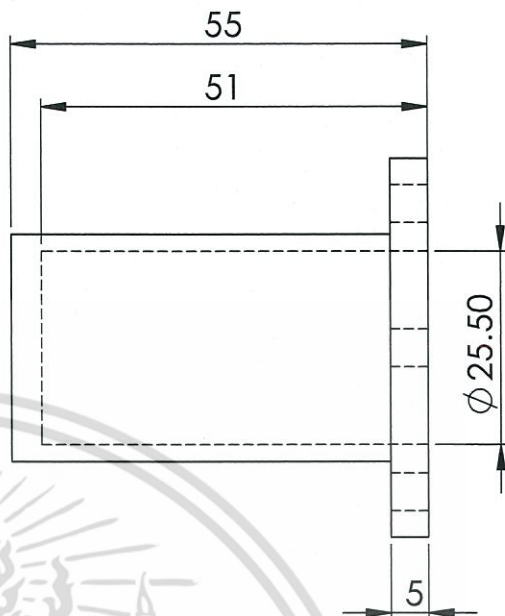
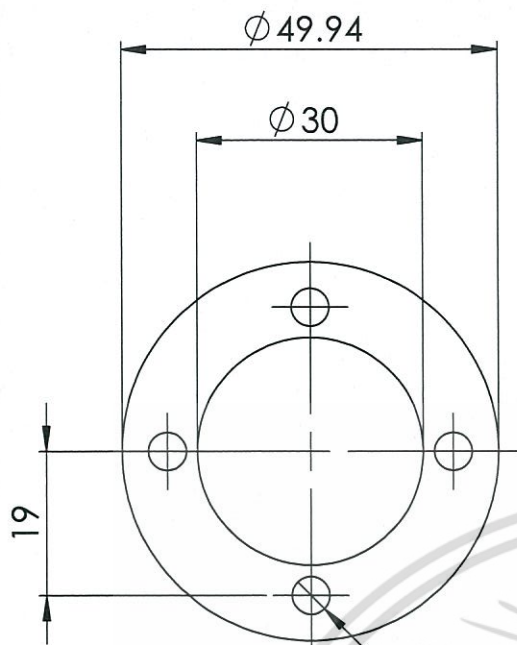


เอกสารอ้างอิง

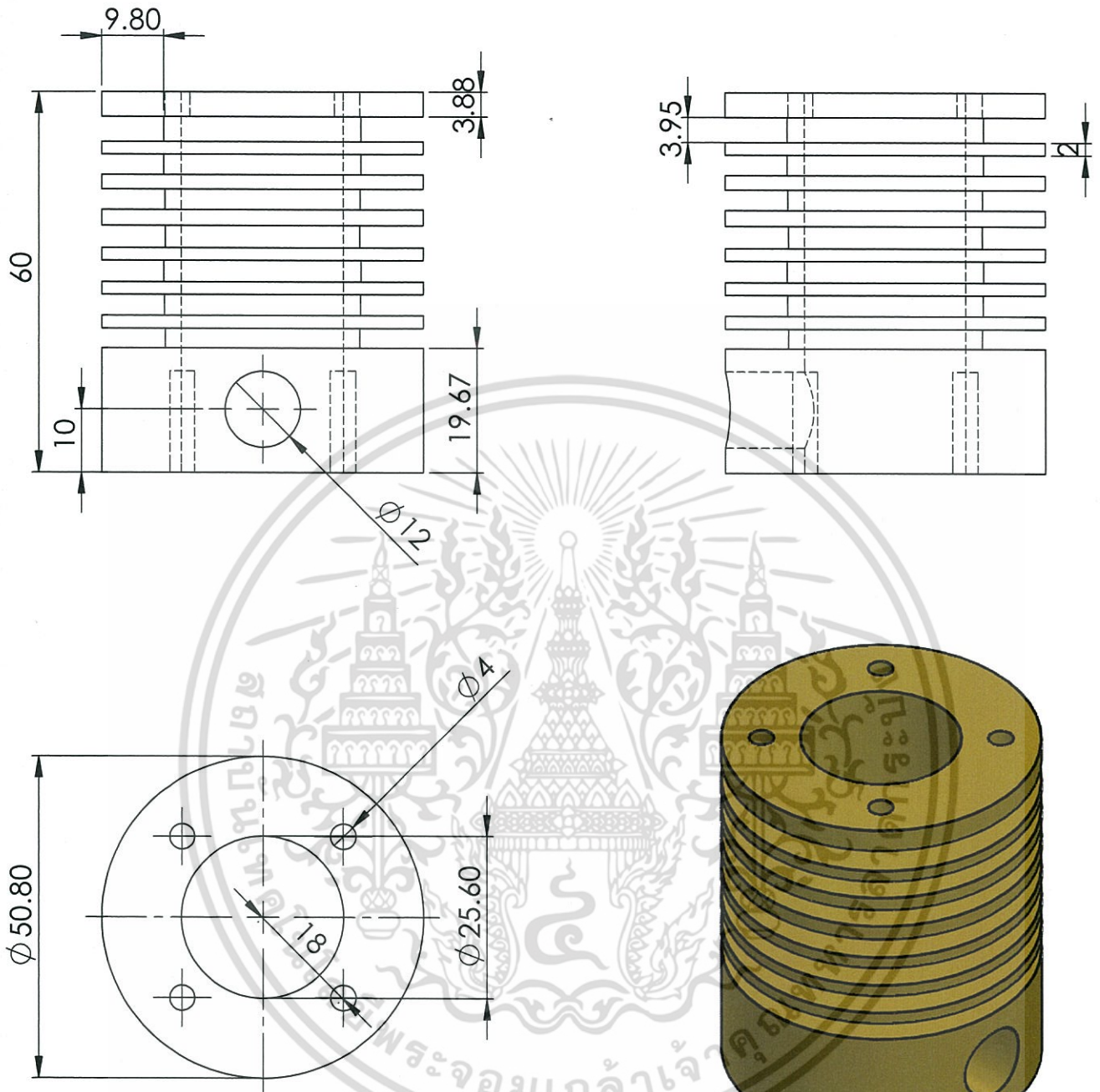
- G, Walker, 1980 **Stirling Engine**. Oxford : Clarendon Press.
- Robert, Foster. Majid, Ghassemi. and Alma, Cota. 2010. **Solar Energy Renewable Energy and the Environment**. New York : CRC Press.
- S, Alfarawi. R, AL-Dadah. And S, Mahmoud. 2016. “Enhanced thermodynamic modeling of a gamma-type Stirling engine.” *Applied Thermal Engineering*. 2016(106) : 1380-1350.
- Jiří, Podešva. Zdeněk, Poruba VSB. 2016. “The Stirling engine mechanism optimization.” *Perspectives in Science*. 2016(7) : 341-346.
- Ohio University. 2010. **Gamma Type Stirling Engines**. [Online].
Available : <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/gamma.html>
- Ohio University. 2010. **Ideal Adiabatic Analysis**. [Online].
Available : <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/adiabatic/adiabatic.html>
- ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่. อะลูมิเนียม. [Online].
Available : <http://lc.dpim.go.th/kb/1084>
- สินเจริญโลหะ. 2012. ทองเหลือง (Brass). [Online].
Available : <http://www.sincharoenloha.com/157925/ทองเหลือง>



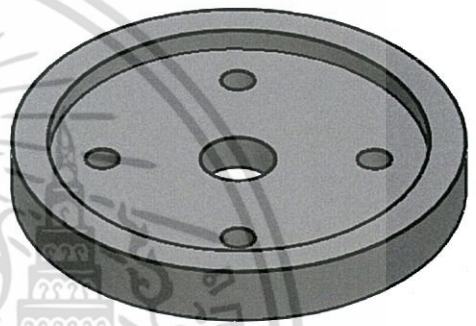
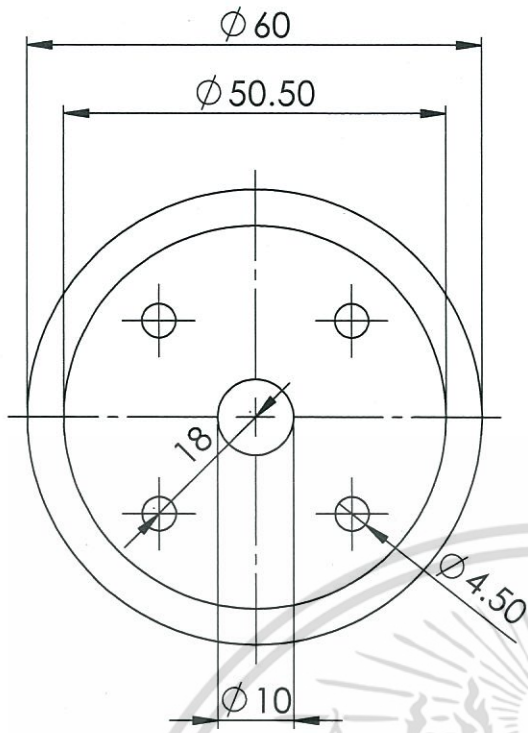
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



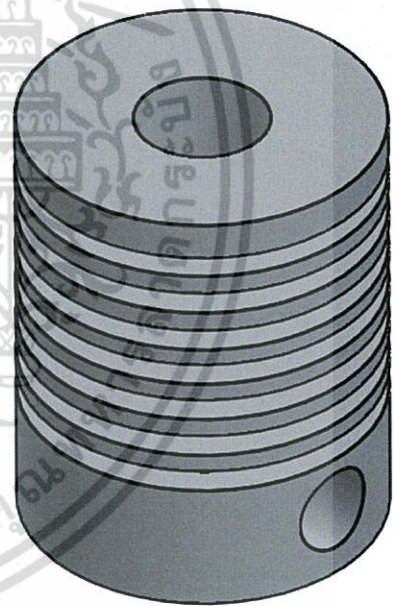
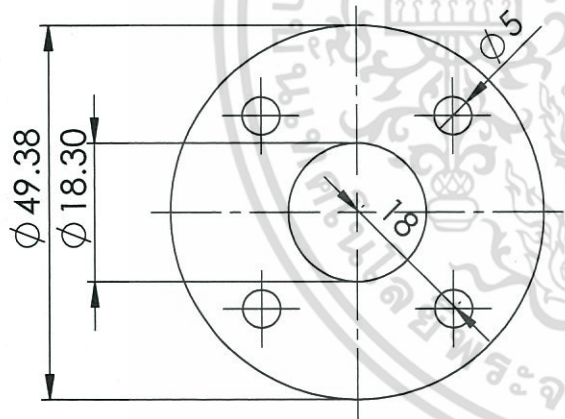
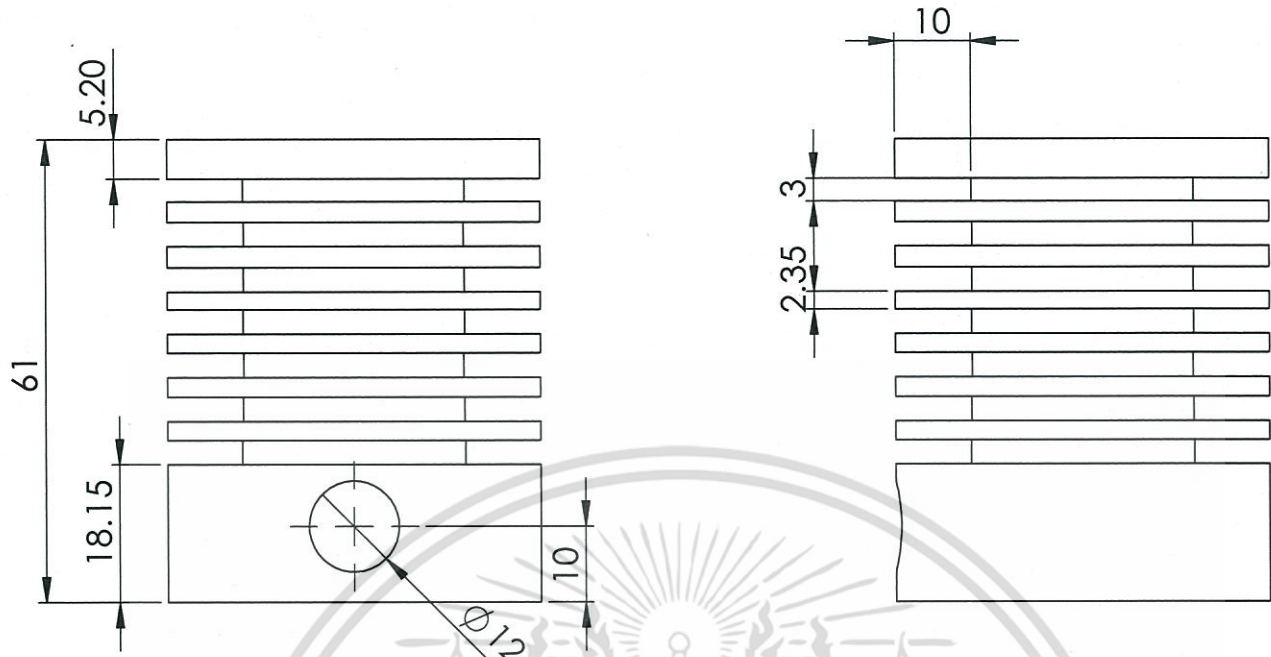
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:			
DRAWN						<p>เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า</p> <p>ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และทำอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้</p>			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A									
						DWG NO. Heater			
						SCALE:1:1			
						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		Dheatsink			
APPV'D				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			

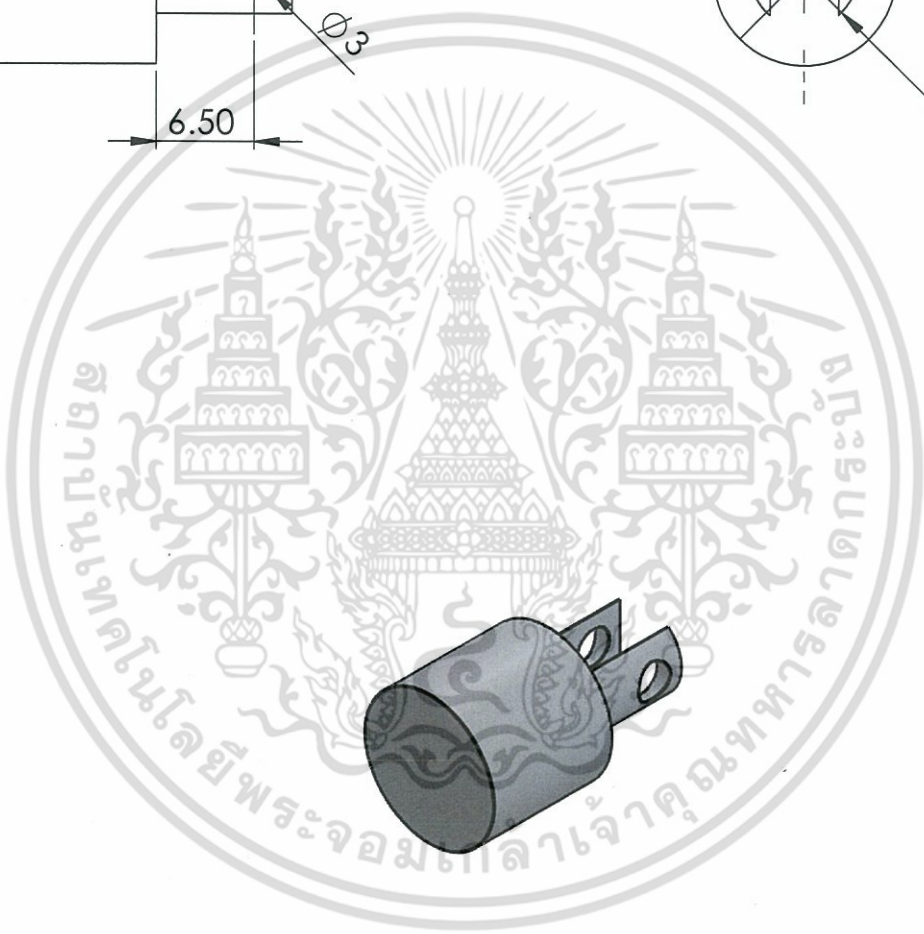
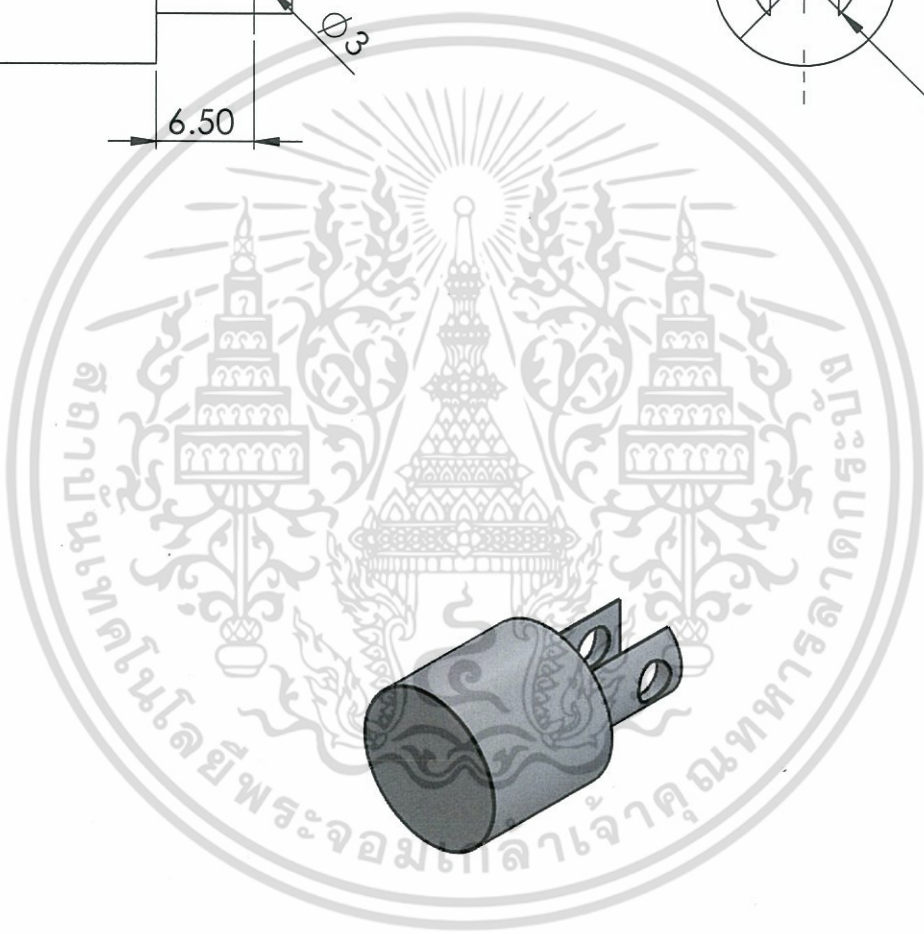
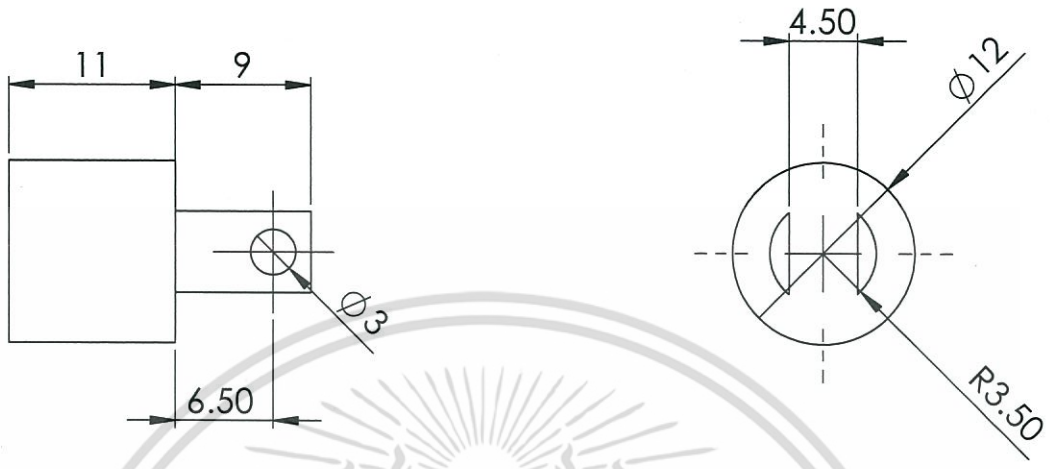


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D						เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งจะมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้			
APPVD									
MFG						MATERIAL:		DWG NO.	
Q.A								Dbutch	
						WEIGHT:		SCALE:1:2	
								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		Pheatsink			
APPV'D		SIGNATURE		DATE		DWG NO.			
MFG		SIGNATURE		DATE		SCALE:1:1			
Q.A.		SIGNATURE		DATE		SHEET 1 OF 1			
		MATERIAL:		WEIGHT:		A4			

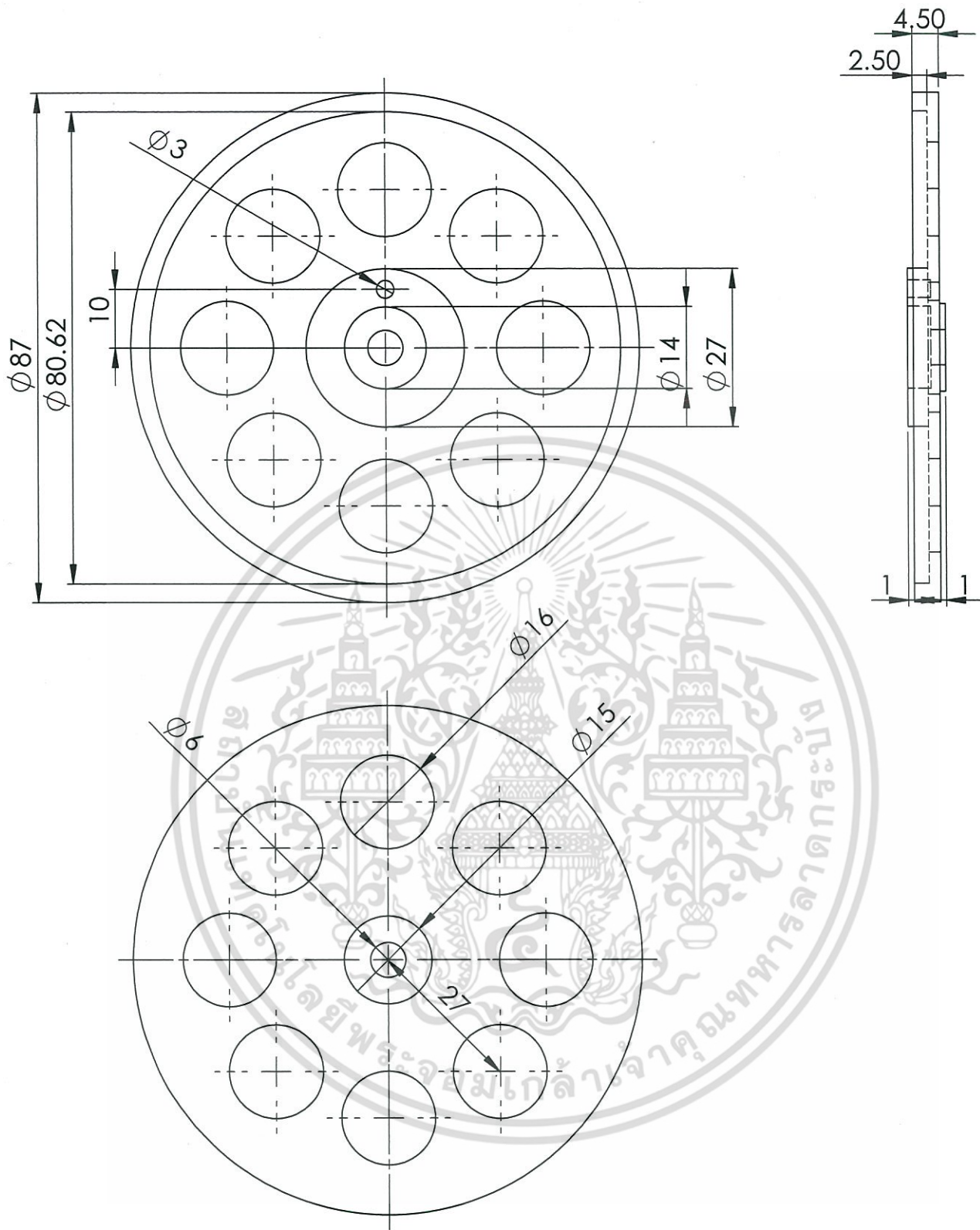
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใดที่นำข้อมูลนี้ไปดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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						เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสงวนไว้ให้กลับแปลเนื้อหา และใช้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A									
				MATERIAL:		DWG NO.		Ppiston	
				WEIGHT:		SCALE:2:1		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:			
CHK'D						เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ควรดัดแปลงแก้ไข หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้			
APPV'D									
MFG						MATERIAL:		DWG NO.	
Q.A								Air pipe drawing	
						WEIGHT:		SCALE:1:1	
								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.

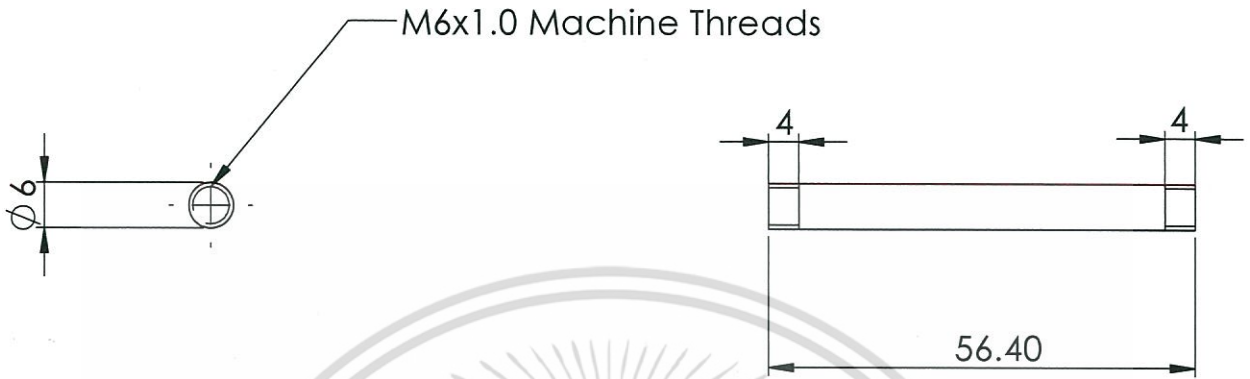
Flywheel drawing

A4

SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1

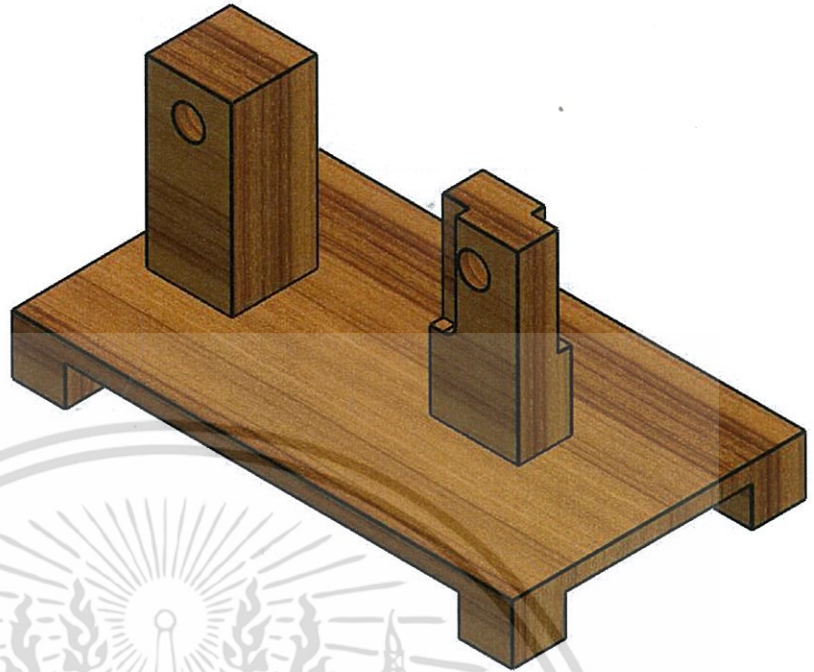
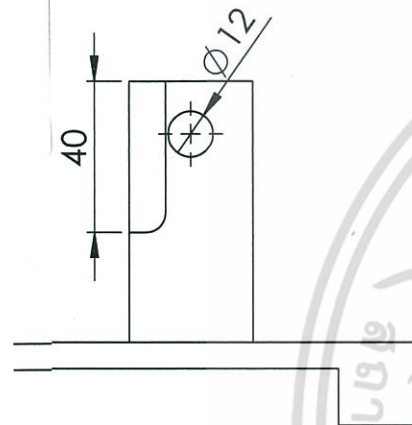
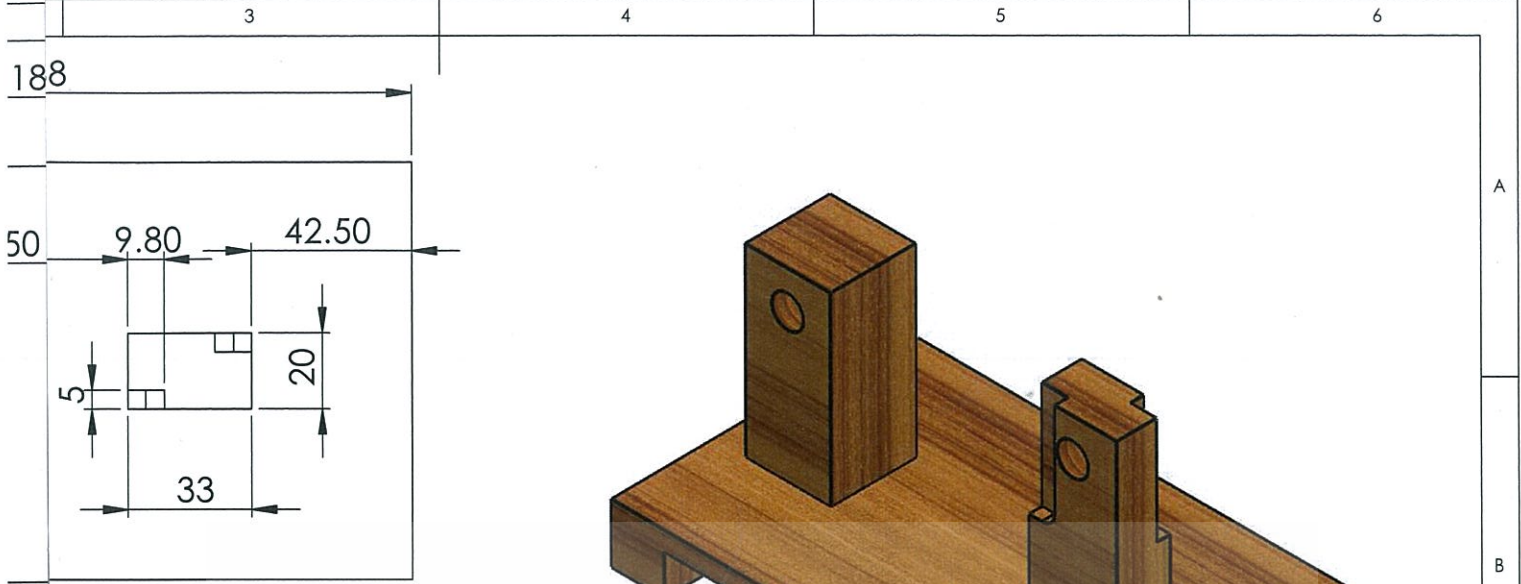
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ควรปรับแก้ใดๆ ทั้งสิ้น หากจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงเนื้อหา กรุณาแจ้งให้เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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									
APPV'D									
MFG									
D.A									
				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	

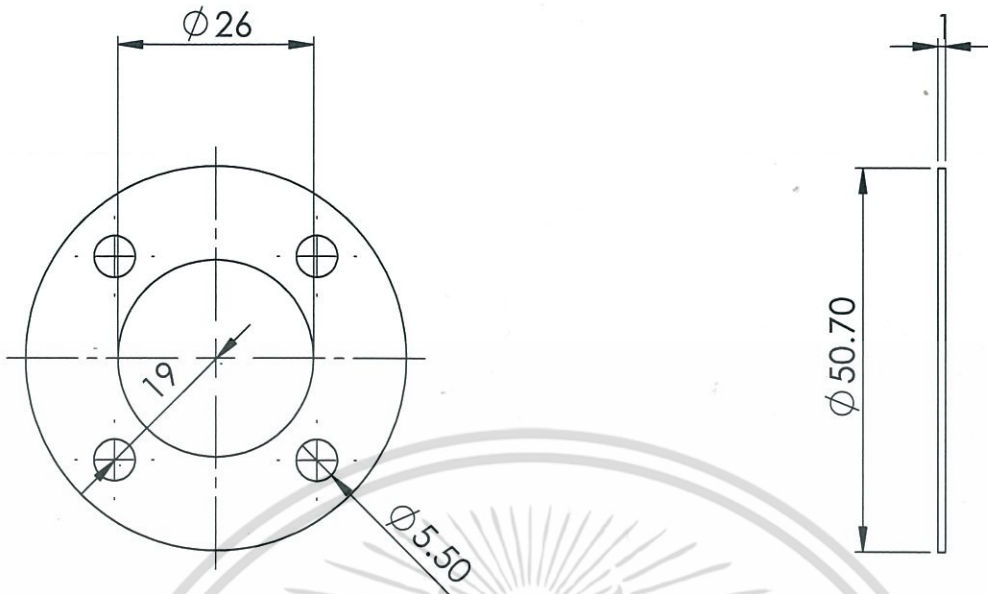
Wheel core drawing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และ



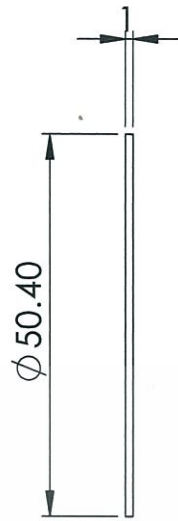
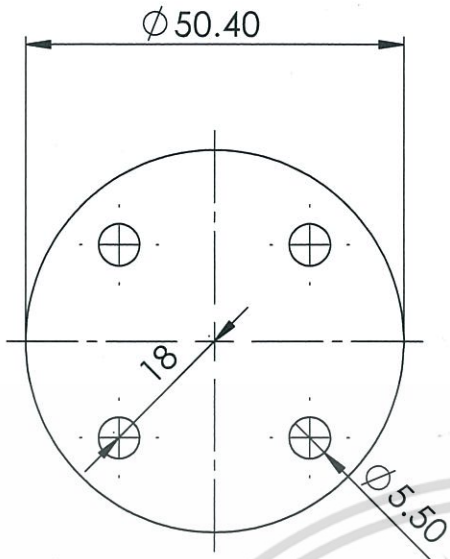
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:			
DRAWN									
CHKD									
APPVD									
MFG									
Q.A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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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									
APPV'D									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.	
								Hgasket	
						WEIGHT:		SCALE:1:1	
								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									
APPV'D									
MFG						MATERIAL:			
Q.A						DWG NO.		A4	
						WEIGHT:		SCALE:1:1	
								SHEET 1 OF 1	

Pgasket

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ผู้ที่นำมามีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งไปยังเจ้าของเอกสารทันที

