

การศึกษาออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
แบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ

A STUDY OF DESIGNING AND TESTING OF A FREE-PISTON STIRLING ENGINE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่สนับสนุนโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-BN-M-100-108

การศึกษาออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
แบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ

A Study of Designing and Testing of a Free-Piston Stirling Engine



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KMITL-2013-EN-M-100-108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Designing and Testing of a Free-Piston Stirling Engine



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
KMUTL-2013-EN-M-100-108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ
Thesis Title A Study of Designing and Testing of a Free-Piston Stirling Engine
นักศึกษา นายทศกร กวี่มงคลรัตน์
รหัสประจำตัว 52611505
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-100-118

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วินัย	กล้าจริง	
ผศ.ดร.ทรงวุฒิ	แสงจันทร์	
ผศ.ดร.บัญชา	คังตระกูล	
ดร.ประสันท	ชุ่มใจหาญ	
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา วันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2556
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ
นักศึกษา	นายทศากร กวิมงคลรัตน์
รหัสประจำตัว	52611505
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง

บทคัดย่อ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซร้อนที่มีศักยภาพสามารถใช้ได้กับพลังงานความร้อนหลายทางเลือกได้แก่ น้ำมันเชื้อเพลิง พลังงานจากชีวมวล พลังงานแก๊สชีวภาพ พลังงานแสงอาทิตย์ ผลพลอยได้ทางการเกษตร พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและขยะ เป็นต้น เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระมีความได้เปรียบที่ดีในด้านความไม่ซับซ้อนทางกลไก จำนวนชิ้นส่วนน้อย จึงทำให้มีขนาดกะทัดรัดกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบกลไกข้อเหวี่ยง วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือการออกแบบและทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิตโดยมีปริมาตรกวาด 23 ลูกบาศก์เซนติเมตร เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระประกอบด้วยสองลูกสูบคือ ลูกสูบดิสเพลเซอร์และลูกสูบกำลังมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.4 เซนติเมตร และ 2.7 เซนติเมตร ตามลำดับและระยะชักของลูกสูบดิสเพลเซอร์และลูกสูบกำลัง 2.1 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตรตามลำดับ เครื่องยนต์ต้นแบบได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบายความร้อนด้วยอากาศ เครื่องยนต์ต้นแบบใช้แรงดันที่ความดันบรรยากาศและใช้อากาศเป็นก๊าซทำงานในการทดลองได้ดำเนินการเพื่อให้ได้สมรรถนะเครื่องยนต์ต้นแบบ ผลจากการทดสอบเครื่องยนต์ต้นแบบ พบว่าเครื่องยนต์มีสมรรถนะประมาณ 0.6 วัตต์ ที่ความถี่ 6.42 Hz ให้พลังงานความร้อน 442 วัตต์

Thesis	A Study of Designing and Testing of a Free-Piston Stirling Engine
Student	Mr. Tisakorn Kaweemongkolrat
Student ID.	52611505
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Sutapat Kwankaomeng

ABSTRACT

A Stirling engine is a hot gas engine that can be used with multi-fuel choices as the heat source. The Stirling engine, therefore, is a potential engine which provides power from biomass, solar energy, or other fuels. The free-piston Stirling engine (FPSE) has good advantage in size over other types of Stirling engines. The FPSE consists of two dynamic pistons, displacer and working piston, reciprocating in along the same cylinder or in-line cylinders resulting in a compact Stirling engine. The objective of this research is to test and evaluate the performance of the FPSE. The FPSE prototype has swept volume of 23 cm^3 , the displacer and working piston diameter of 4.4 cm and 2.7 cm, respectively, and the displacer and working piston stroke of 2.1cm and 4 cm, respectively. The prototype is heated by heater and cooled by air. The engine is pressurized at an atmospheric pressure of air as the working gas. The experimental investigations were conducted in order to obtain the engine characteristics. The testing results of the FPSE showed that the engine obtained output power about 0.6 W at 6.42 Hz of engine frequent with the input heat of 442 W from electric heater.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตาภภัทร แคว้นเขมาเมืองอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะช่วยแก้ไขปัญหาลดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์บรรเทิง ศิลป์สกุลสุข และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.บัญชา คังตระกูลที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบและทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ปานมนัส ศิริสมบุญ และ ดร. ประสันต์ ชุ่มใจหาญที่ให้คำปรึกษาและสนับสนุนอุปกรณ์ในการทดสอบเครื่องยนต์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งห้าท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณนายจตุรงค์ ทริเลิศรัฐ เจ้าของบริษัท วี. เอ็น. สยามการช่าง(2005)จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้าน การสร้างชิ้นส่วนของเครื่องยนต์

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ให้คำแนะนำ กำลังใจและช่วยเหลือข้าพเจ้าในเรื่องการเรียน และการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

“ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง”

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ทศากร กวิมงคลรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับวิศวกรรมเกษตร.....	3
บทที่ 2 การตรวจสอบเอกสาร.....	5
2.1 ทบทวนวรรณกรรม.....	5
บทที่ 3 การออกแบบและการคำนวณ.....	18
3.1 ลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ.....	18
3.2 การคำนวณขนาดของเครื่องยนต์.....	21
3.3 สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ.....	23
3.4 การคำนวณและการออกแบบ Fin.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีผู้ฝ่าฝืนจะดำเนินการตามกฎหมายต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ให้นำไปตีพิมพ์หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีผู้ฝ่าฝืนจะดำเนินการตามกฎหมายต่อไป

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การคำนวณหาค่าคงที่สปริงแก๊ส.....	28
3.7 การสันสเทือนแบบบังคับด้วยแรงฮาร์มอนิกส์.....	31
บทที่ 4 การวิเคราะห์เครื่องยนต์ต้นแบบ.....	32
4.1 ผลจากการวิเคราะห์ความเค้นของลูกสูบกำลังที่เกิดขึ้นเมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์.....	32
4.2 ผลจากการวิเคราะห์Displacementที่เกิดขึ้นกับลูกสูบกำลังเมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์.....	34
4.3 ผลจากการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับลูกสูบดิสเพลเซอร์ปเมื่ออัดความดันที่3บาร์.....	35
4.4 ผลจากการวิเคราะห์Displacement ที่เกิดขึ้นกับลูกสูบดิสเพลเซอร์ เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์.....	36
4.5 ผลจากการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับเสื้อสูบดิสเพลเซอร์ เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์.....	37
4.6 ผลจากการวิเคราะห์Displacement ที่เกิดขึ้นกับเสื้อสูบดิสเพลเซอร์ เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์.....	38
4.7 ผลจากการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับกระบอกลูกสูบดิสเพลเซอร์ เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์.....	39
4.8 ผลจากการวิเคราะห์Displacement ที่เกิดขึ้นกับกระบอกลูกสูบดิสเพลเซอร์ เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์.....	40
4.9 ผลจากการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับเสื้อสูบลูกสูบกำลังเมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์.....	41
4.10 ผลจากวิเคราะห์Displacement ที่เกิดขึ้นกับเสื้อสูบของลูกสูบ เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์.....	42
บทที่5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	44
5.1 การศึกษาวัสดุที่นำมาใช้สร้างเครื่องยนต์ต้นแบบ.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 การทดสอบเครื่องยนต์ต้นแบบ	52
6.1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ.....	52
6.2 การทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิต	57
บทที่ 7 ผลการทดสอบ.....	63
7.1 ผลลัพธ์จากการทดสอบหาความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์.....	63
7.2 ผลการทดสอบทางไฟฟ้าของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	
แบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิต.....	66
บทที่ 8 สรุปโครงการและข้อเสนอแนะ	69
8.1 สรุปโครงการ.....	69
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก.....	74
ภาคผนวก ข.....	79
ภาคผนวก ค.....	87
ภาคผนวก ง.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ข้อมูลตารางทางเทคนิคของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ.....	45
7.1 ผลลัพธ์จากการทดสอบหาความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์.....	64



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้าที่
1.1 นายโรเบิร์ต สเตอร์ลิง(Robert Stirling).....	1
1.2 เปลือกและซังข้าวโพด.....	4
1.3 เปลือกสบู่ดำ.....	4
1.4 แกลบ.....	4
1.5 ตอซังและฟางข้าว.....	4
1.6 เปลือกเม็ดมะม่วงหิมพาน.....	4
1.7 กะลาและเปลือกมะพร้าว.....	4
2.1 เครื่องยนต์ต้นแบบที่มีขนาดกำลัง 7 kW.....	5
2.2 แสดงเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ได้พัฒนาใหม่มีขนาด 10 kW.....	6
2.3 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของการผลิตกระแสไฟฟ้ากับความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ.....	6
2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาด 5 kW.....	7
2.5 เครื่องยนต์ต้นแบบขนาด 2.5 kW(e) ที่ใช้ในการทดสอบกับเชื้อเพลิงชีวมวล.....	7
2.6 เครื่องยนต์ต้นแบบประกอบกับlinear alternator ขนาด 2.5 kW(e).....	8
2.7 แสดงการทดสอบเครื่องยนต์ขนาด 1 kW.....	8
2.8 เครื่องยนต์ที่ได้ทำการทดสอบ.....	9
2.9 ส่วนประกอบต่างของเครื่องทดสอบ.....	9
2.10 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาด 35 วัตต์ EE-35 FPSE.....	9
2.11 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระรุ่น 35 W _(e)	10
2.12 เครื่องยนต์ Advanced Stirling Convertor (ASC).....	10
2.13 การทดสอบเครื่องยนต์ Advanced Stirling Convertor.....	11
2.14 การติดตั้งเครื่องยนต์ Advanced Stirling Convertor.....	11

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
2.15 แบบ CryoTel MT Cryocooler.....	12
2.16 แบบ CryoTelTM CT Cryocooler.....	12
2.17 แบบ CryoTel GT Cryocooler.....	13
2.18 การติดตั้งเครื่องยนต์ Infinia PowerDish กับงานรวมแสงขนาด 3.2 kW.....	13
2.19 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยนต์ Infinia PowerDish.....	14
2.20 เครื่องยนต์.Power Dish ขณะทำงาน.....	14
2.21 เครื่องยนต์ต้นแบบขนาดเครื่องยนต์ละ5 กิโลวัตต์.....	15
2.22 การทำงานของเครื่องยนต์แบ่งออกเป็น 2 คู่ คู่ละ 15กิโลวัตต์.....	15
2.23 การประกอบของเครื่องยนต์ต้นแบบขนาด 30 กิโลวัตต์.....	16
2.24 ตัวอย่างของเครื่องยนต์ต้นแบบขนาด 30 กิโลวัตต์.....	16
2.25 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องยนต์ต้นแบบขนาด30 กิโลวัตต์.....	17
3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ.....	19
3.2 วัฏจักรสเตอร์ลิง.....	20
3.3 ภาพแสดงแบบเครื่องยนต์ 2 มิติ.....	21
3.4 ภาพแสดงแบบเครื่องยนต์ 3 มิติ.....	22
3.5 กราฟ P-V และ T- S.....	23
3.6 แสดงการเคลื่อนที่ของลูกสูบ.....	28
3.7 การสันสะท้อนแบบบังคับของระบบที่ไม่มีการหน่วงใน2ระดับชั้น ความเสรีภายใต้แรงฮาร์โมนิกส์.....	31
4.1 การวิเคราะห์ความเค้นของลูกสูบกำลังมองจากด้านข้าง.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
4.2 การวิเคราะห์ความเค้นของลูกสูบกำลังมองจากด้านบน.....	34
4.3 การวิเคราะห์ Displacement ของลูกสูบกำลังมองจากด้านข้าง.....	34
4.4 การวิเคราะห์ Displacement ของลูกสูบกำลังมองจากด้านบน.....	35
4.5 การวิเคราะห์ความเค้นลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านข้าง.....	35
4.6 การวิเคราะห์ความเค้นลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านบน.....	36
4.7 การวิเคราะห์Displacement ลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านข้าง.....	36
4.8 การวิเคราะห์Displacement ลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านบน.....	37
4.9 การวิเคราะห์ความเค้นเสื้อลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านข้าง.....	37
4.10 การวิเคราะห์ความเค้นเสื้อลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านบน.....	38
4.11 การวิเคราะห์Displacement เสื้อลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านข้าง.....	38
4.12 การวิเคราะห์Displacement เสื้อลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านบน.....	39
4.13 การวิเคราะห์ความเค้นกระบอกลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านข้าง.....	39
4.14 การวิเคราะห์ความเค้นกระบอกลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านบน.....	40
4.15 การวิเคราะห์Displacementกระบอกลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านข้าง.....	40
4.16 การวิเคราะห์Displacementกระบอกลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านบน.....	41
4.17 การวิเคราะห์ความเค้นเสื้อเสื้อลูกสูบกำลังมองจากด้านข้าง.....	41
4.18 การวิเคราะห์ความเค้นเสื้อของลูกสูบกำลังมองจากด้านบน.....	42
4.19 การวิเคราะห์Displacementเสื้อของลูกสูบมองจากด้านข้าง.....	42
4.20 การวิเคราะห์Displacementเสื้อของลูกสูบมองจากด้านบน.....	43
5.1 รูปต้นแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
5.2 กระบอกสูบดิสเพสเซอร์.....	46
5.3 ลูกสูบดิสเพสเซอร์.....	46
5.4 หัวเผาและเสื่อสูบดิสเพสเซอร์กักเก็บความร้อนด้วยรีเจนเนอเรเตอร์.....	47
5.5 กระบอกสูบของลูกสูบกำลัง.....	47
5.6 ก้านสูบดิสเพสเซอร์.....	48
5.7 ก้านสูบกำลัง.....	48
5.8 ลูกสูบกำลัง.....	49
5.9 หน้าแปลนยึดเสา.....	49
5.10 เสายึดหน้าแปลน.....	50
5.11 สปริง.....	50
5.12 รีเจนเนอเรเตอร์.....	51
6.1 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด.....	52
6.2 มัลติมิเตอร์ (Multimeter UT30C UNI-T).....	53
6.3 มัลติมิเตอร์ (Multimeter UN-860C Union).....	53
6.4 แคลมป์มิเตอร์.....	54
6.5 ฮีตเตอร์ (Heater).....	54
6.6 เกจวัดความดัน (Pressure Gauges).....	55
6.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator).....	55
6.8 ชุดโหลดไฟฟ้า.....	56
6.9 นาฬิกาจับเวลา.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
6.10	ตู้ควบคุมอุณหภูมิ.....57
6.11	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาความร้อนที่ป้อนให้แก่สารทำงาน.....58
6.12	ภาพถ่ายแสดงการทดสอบหาความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์.....59
6.13	ภาพถ่ายแสดงการติดตั้งฮีเตอร์เข้ากับกระบอกสูบดิสเพสเซอร์.....59
6.14	การวัดอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น.....61
6.15	ภาพถ่ายแสดงการทดสอบกำลังทางไฟฟ้าของเครื่องยนต์.....62
7.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาครั้งที่ 164
7.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาครั้งที่ 265
7.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาครั้งที่ 365
7.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาครั้งที่ 466
7.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องยนต์67
7.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของเครื่องยนต์กับเวลา.....67
7.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา68
8.1	แบริ่งก้านสูบของดิสเพสเซอร์.....70
8.2	ก้านสูบของดิสเพสเซอร์.....70

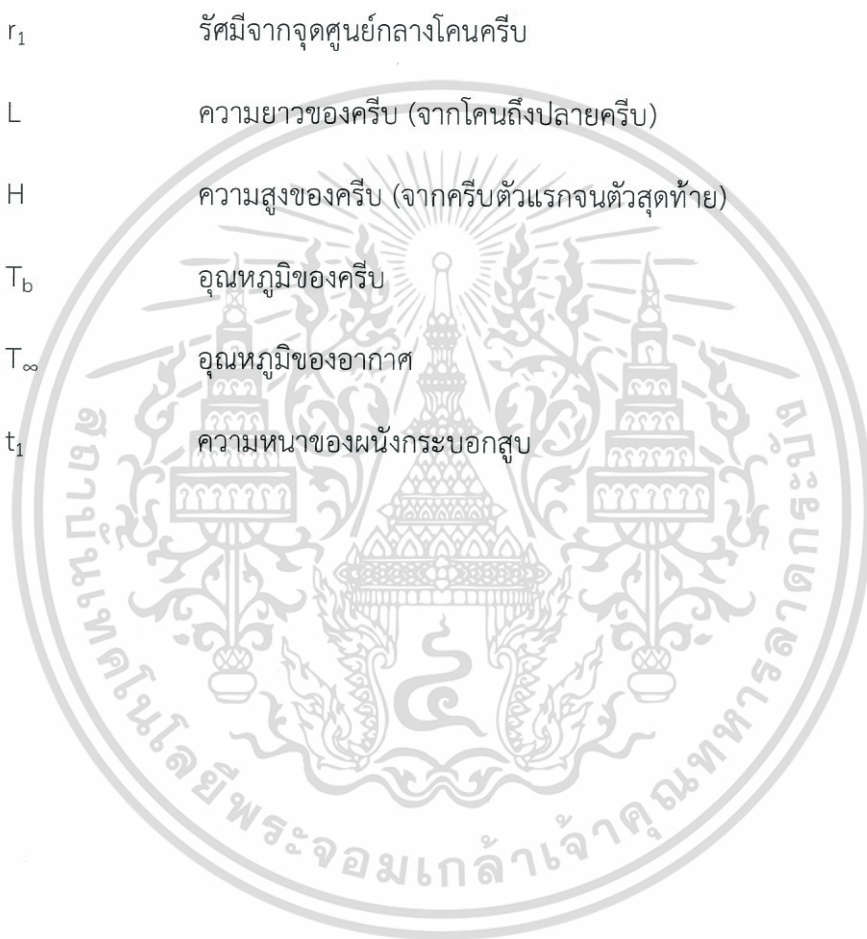
รายการสัญลักษณ์(Nomenclature)

		หน่วย
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
M_a	มวลอากาศ	kg
V_{mac}	ปริมาตรสูงสุด	m^3
V_{min}	ปริมาตรต่ำสุด	m^3
P	ความดัน	N/m^3
V_p	ปริมาตรกระบอกสูบ Power piston	cm^3
V_D	ปริมาตรกระบอกสูบ Displacer	cm^3
r_p	รัศมีกระบอกสูบ Power piston	cm
r_D	รัศมีกระบอกสูบ Displacer	cm
Q	ปริมาณความร้อน	kJ
R	ค่าคงที่ของแก๊ส	kJ/kg.K
T	อุณหภูมิ	K
N	จำนวนรอบ	rpm
v_p	Mean piston speed	m/s
F	Force	kN
P_m	ความดันเฉลี่ย	N/m^3
f	ความถี่	Hz
V_p	ปริมาตรกวาดของลูกสูบ	m^3
S_p	ระยะชัก	m
t	ความหนาของผนังกระบอกสูบ	m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วย

d	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบ	m
σ	ค่าความดันอนุญาตสูงสุด	N/m^3
t	ความหนาครีป	m
r_2	รัศมีจากจุดศูนย์กลางปลายครีป	m
r_1	รัศมีจากจุดศูนย์กลางโคนครีป	m
L	ความยาวของครีป (จากโคนถึงปลายครีป)	m
H	ความสูงของครีป (จากครีปตัวแรกจนตัวสุดท้าย)	m
T_b	อุณหภูมิของครีป	K
T_∞	อุณหภูมิของอากาศ	K
t_1	ความหนาของผนังกระบอกสูบ	m



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

ปัจจุบันพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในประเทศไทยคือเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลเป็นต้นกำเนิดพลังงาน อาทิเช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลเหล่านี้มีแนวโน้มลดน้อยลง และจะหมดลงในอนาคตอันใกล้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องคิดค้นเครื่องยนต์หรือประยุกต์เครื่องยนต์ใหม่ที่สามารถใช้พลังงานได้หลายรูปแบบ ดังนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงมีความน่าสนใจคือเครื่องยนต์ไม่มีการสันดาปภายในทำให้สามารถใช้พลังงานได้หลายรูปแบบเหมาะสมกับประเทศไทยที่มีเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นจำนวนมาก เช่น แกลบ ชี้เลี้ยง ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ทลายปาล์มและกะลาปาล์ม เปลือกผลไม้ และเศษไม้จากการตัดแต่งต้นไม้ หรือที่มาจากกาการเพาะปลูกโดยตรง เช่น ไม้โตเร็วหลายชนิด เช่น สบู่ดำ ยูคาลิปตัส เป็นต้น



รูปที่ 1.1 นายโรเบิร์ต สเตอร์ลิง(Robert Stirling)

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีการยื่นจดสิทธิบัตรสำเร็จครั้งแรกในปี คศ.1817 โดยชาวสก๊อตแลนด์ชื่อ โรเบิร์ต สเตอร์ลิง(Robert Stirling) เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่มีชิ้นส่วนสำคัญเพียงไม่กี่ชิ้นจึงทำให้เครื่องยนต์มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการใช้งาน สามารถนำไปใช้ได้กับแหล่งพลังงานความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเชื้อเพลิงที่หลากหลาย มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง อีกทั้งไม่มีการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ ทำให้ ไร้มลพิษที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ ลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงช่วยลดปัญหาโลกร้อน

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระมีความน่าสนใจคือรูปแบบของเครื่องยนต์มี กะทัดรัดกว่าแบบอื่น ไม่มีการเชื่อมต่อกับเพลาค้อเหวี่ยงและล้อช่วยแรง ทำให้ไม่มีแรงเสียดทานมาก สามารถทำงานได้กับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้การจางรวมแสง งานที่ได้จากเครื่องยนต์อาศัยการ เคลื่อนไหวของลูกสูบกำลัง โดยนำแม่เหล็กยึดติดกับก้านสูบของลูกสูบกำลังเมื่อลูกสูบกำลังเคลื่อนไหวจะ เกิดตัดกันของแม่เหล็กกับขดลวดทองแดงทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบ เคลื่อนที่อิสระจึงเป็นเครื่องยนต์ที่น่าสนใจอย่างมากเพราะสามารถนำมาใช้และพัฒนาเป็นระบบผลิต ไฟฟ้ากับพลังงานทดแทนที่ยั่งยืน จึงมีงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าใน หลายประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาด สมิติ
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์หาคุณลักษณะและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่ อิสระ
- 1.2.4 เพื่อรวบรวมข้อมูลของเครื่องยนต์ที่ได้ทำการทดสอบและเสนอแนวทางในการสร้าง เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ออกและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสมิต
- 1.3.2 วิเคราะห์การทำงานและทดสอบหากำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่ อิสระ
- 1.3.3 เก็บรวบรวมข้อมูลการทำงานและผลการทดสอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบ เคลื่อนที่อิสระ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสมิต
- 1.4.2 ได้ข้อมูลการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ
- 1.4.3 ได้ข้อมูลเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ พัฒนาและปรับปรุงเครื่องยนต์สเตอร์ลิง แบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในส่วนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย 8 บท คือ

- บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญ ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ
- บทที่ 2 การตรวจเอกสาร
- บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและการคำนวณ
- บทที่ 4 วิเคราะห์หาคุณลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ
- บทที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินการ
- บทที่ 6 การทดสอบเครื่องยนต์ต้นแบบ
- บทที่ 7 ผลการทดสอบ
- บทที่ 8 สรุปโครงการและข้อเสนอแนะ

1.6 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับวิศวกรรมเกษตร

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซร้อนที่มีศักยภาพสามารถใช้ได้กับพลังงานหลายรูปแบบ ได้แก่ น้ำมันเชื้อเพลิง พลังงานจากชีวมวล พลังงานแก๊สชีวภาพ พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือวัสดุทางการเกษตร ซึ่งเหมาะกับประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีทรัพยากรและศักยภาพผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากผลพลอยได้และของเสียทางการเกษตร รวมทั้งอุตสาหกรรมเกษตร ซึ่งในปัจจุบันมีหลายชุมชนแบบอย่างที่สามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล และโรงงานอุตสาหกรรมสามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากของเสียและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะชีวมวลซึ่งได้จากผลพลอยได้ทางการเกษตร(agricultural byproduct) เช่น แกลบ ชี้เลี้ยง ชัง ข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ทลายปาล์ม กะลาปาล์ม เปลือกผลไม้ และเศษไม้จากการตัดแต่งต้นไม้ หรือที่มาจากการเพาะปลูกโดยตรง เช่น ไม้โตเร็วหลายชนิด เช่น สบู่ดำ ยูคาลิปตัส เป็นต้น

ดังนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงเป็นเครื่องยนต์ที่น่าสนใจจะนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้แก่ครัวเรือน หรือชุมชน เนื่องจากและ มีต้นทุนในการสร้างเครื่องยนต์ไม่สูงมากนักเป็นที่ยอมรับของสังคม และเหมาะสมสำหรับประเทศของเรา ในภาพที่ 1.2 – 1.6 แสดงภาพวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร



รูปที่ 1.2 เปลือกและซังข้าวโพด



รูปที่ 1.3 เปลือกสับดูดำ



รูปที่ 1.4 แกลบ



รูปที่ 1.5 ตอซังและฟางข้าว



รูปที่ 1.6 เปลือกเม็ดมะม่วงหิมพาน



รูปที่ 1.7 กะลาและเปลือกมะพร้าว

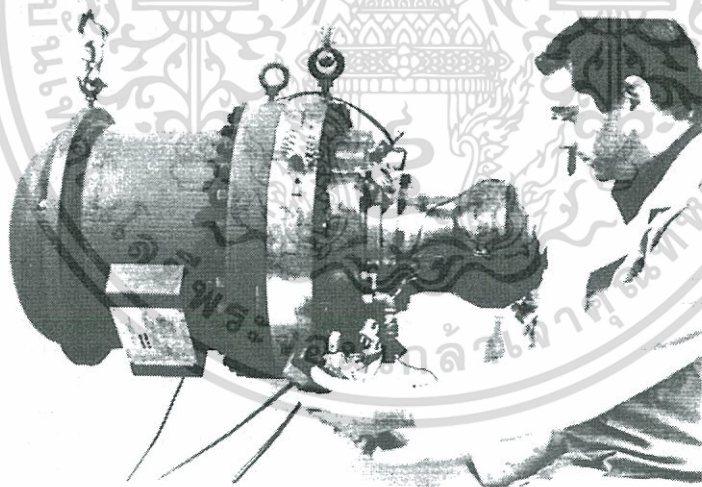
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 การทบทวนวรรณกรรม

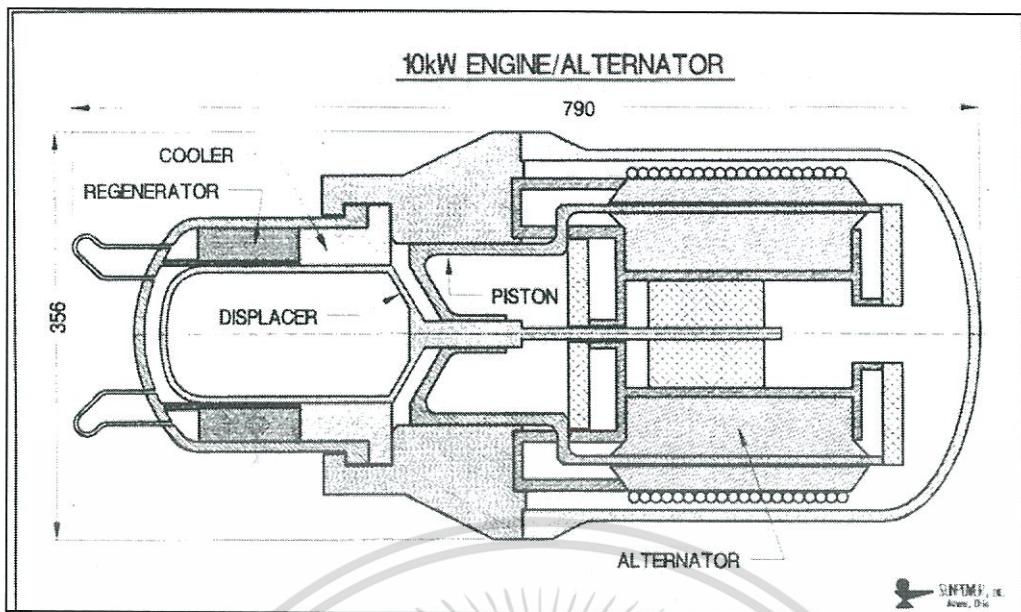
ในปี ค.ศ.1960 William Beale อาจารย์วิศวกรรมเครื่องกลที่มหาวิทยาลัยโอไฮโอ[1] ได้คิดค้นและประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ หลังจากนั้นในปีค.ศ. 1974 เขาได้จัดตั้งบริษัท Sunpower โดยมีการดำเนินงานวิจัยทางด้านเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ ตั้งแต่ช่วงกลางยุค 70 บริษัท Sunpower, Inc ได้เริ่มมีการออกแบบและการพัฒนาเครื่องยนต์ต้นแบบเพื่อใช้งานในด้านอวกาศ ด้านการทหาร ด้านเครื่องใช้ในครัวเรือนและด้านอุตสาหกรรม [2] โดยขนาดกำลังของเครื่องยนต์ที่ได้พัฒนาตั้งแต่ 35-7.5 kW(e) และมีการพัฒนาให้เครื่องยนต์สามารถใช้งานได้กับแหล่งความร้อนที่หลากหลายได้แก่เชื้อเพลิงฟอสซิล ชีวมวล ก๊าซชีวภาพและพลังงานแสงอาทิตย์ [3] William Beale และ Gong Chen ได้นำเสนอเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระที่ขนาดเล็กกับระบบที่ให้การกำเนิดพลังงานไฟฟ้า [4] โดยงานวิจัยได้กล่าวถึงเครื่องยนต์ต้นแบบที่มีขนาดกำลัง 7 kW ได้นำเสนอในรูปที่ 2.1 และได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์ให้มีกำลัง 10 kW ที่ความถี่ 60 Hz ประสิทธิภาพ 35 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ของการผลิตกระแสไฟฟ้ากับความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ



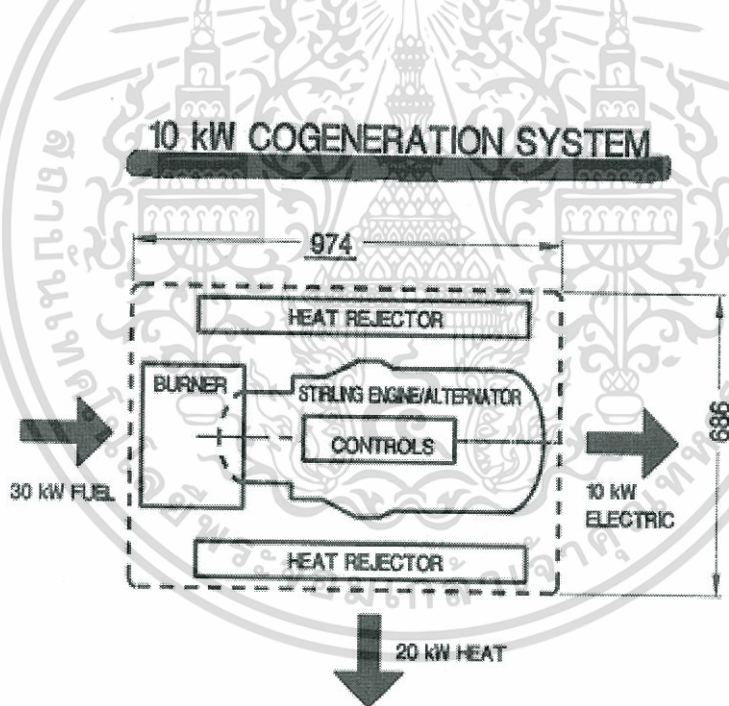
*Figure 2: 7 kW Engine/Alternator
Undergoing Final Tests in Sunpower Test
Cell*

รูปที่ 2.1 เครื่องยนต์ต้นแบบที่มีขนาดกำลัง 7 kW [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



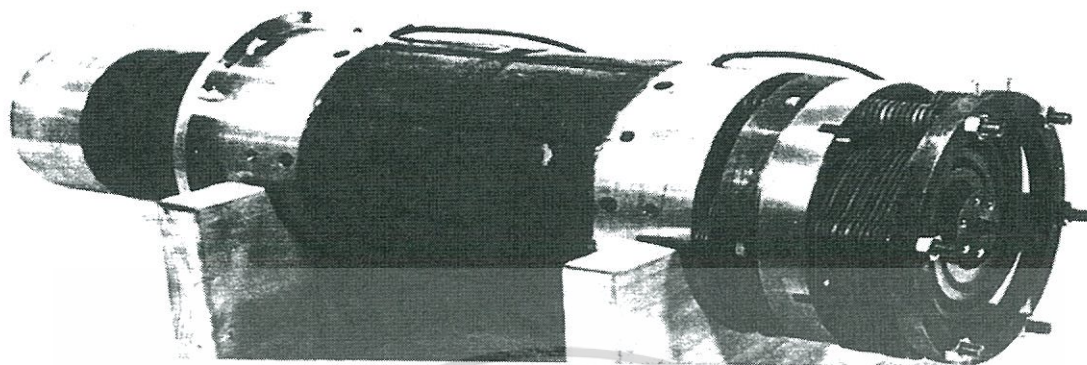
รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ได้พัฒนาใหม่มีขนาด 10 kW [4]



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของการผลิตกระแสไฟฟ้ากับความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ [4]

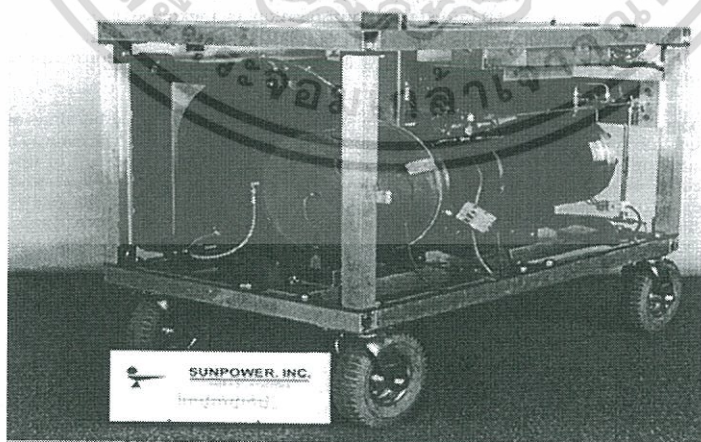
Neill W.Lane และ William Beale ได้นำเสนอเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาด 5 kW [5] ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้มีการนำเสนอการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาด 5 kW โดยใช้ซีเลียมเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนผลจากการทดสอบในครั้งแรกได้กำลัง 1750 วัตต์ ที่ความร้อน 400 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 21 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นมีการเพิ่มอุณหภูมิที่ป้อนให้กับค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องยนต์จาก 400 องศาเซลเซียสเป็น 608 องศาเซลเซียสได้กำลังของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นเป็น 3000 วัตต์ และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 32 เปอร์เซ็นต์ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาด 5 kW [5]

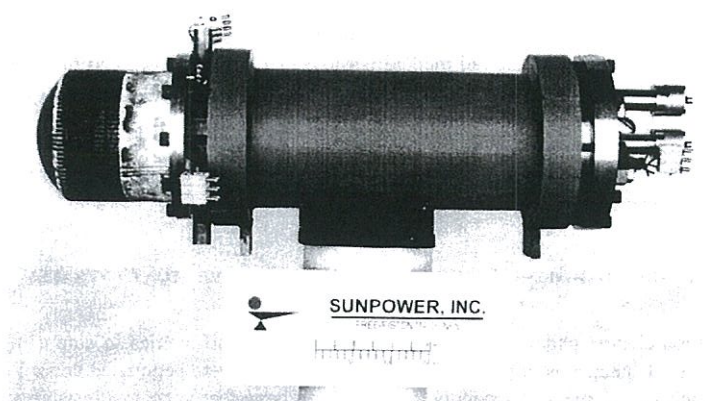
Neill W.Lane และ William T.Beale ได้นำเสนอการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลขนาดเล็กโดยใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระเป็นเครื่องต้นกำลังมีขนาด 2.5-5 kW(e) [6] ในงานวิจัยนี้ได้มีการกล่าวถึงข้อมูลการทดสอบของเครื่องยนต์ขนาด 2.5 kW ในรูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6 จากข้อมูลดังกล่าวทำให้มีการแนะนำการออกแบบเครื่องยนต์ใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิมคือขนาดของเครื่องยนต์อยู่ที่ 3 kW อุณหภูมิที่ทำงาน 600 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ โดยให้กระบวนการเผาไหม้ 2 ขั้นตอนมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ 85 เปอร์เซ็นต์



Photograph 1. Stand Alone 2.5 kW_e Propane Fired Generator

รูปที่ 2.5 เครื่องยนต์ต้นแบบขนาด 2.5 kW(e) ที่ใช้ในการทดสอบกับเชื้อเพลิงชีวมวล [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Photograph 2. Prototype engine with integral linear alternator

รูปที่ 2.6 เครื่องยนต์ต้นแบบประกอบกับlinear alternator ขนาด 2.5 kW(e) [6]

L.Bowman และ N. W. Lane ได้นำเสนอโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก [7] โดยมีการกล่าวถึง บริษัท Sunpower ได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระเพื่อใช้ในการผลิต กระแสไฟฟ้าขนาด 20 kW จากเชื้อเพลิงชีวมวล แต่ในงานวิจัยขั้นนี้ทั้งสองได้นำเสนอการทดสอบเครื่องยนต์ ขนาด 1 kW(e) ในการทดสอบได้ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบเป็นเม็ดมีการเผาไหม้ด้วย ระบบไมโครไฟฟ้า โดยมี จุดมุ่งหมายที่จะแนะนำผลิตภัณฑ์เหล่านี้ในปี 2001 ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการทดสอบเครื่องยนต์ขนาด 1 kW(e) [7]

Jams Huth และ Josh Collins [8] ได้นำเสนอการใช้งานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่ อิสระรุ่น 35 วัตต์ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในงานวิจัยได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้สามารถใช้งานกับค่า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

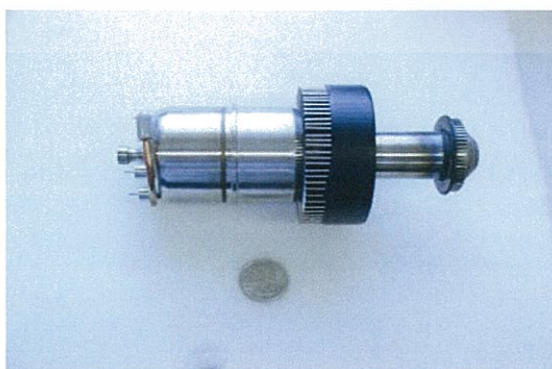
น้ำมันดีเซลเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์มีขนาดกะทัดรัดและพกพาได้ง่ายมีส่วนประกอบต่างในรูปที่ 2.9 จากการทดสอบเครื่องยนต์ในรูปที่ 2.10 มีประสิทธิภาพ 21 เปอร์เซ็นต์ มีระบบการทำงานที่เงียบการสั่นน้อยสามารถนำไปต่อใช้งานกับระบบไฟฟ้าได้ง่ายเหมาะกับใช้งานในพื้นที่ไม่มีไฟฟ้าหรือชนบท



รูปที่ 2.8 เครื่องยนต์ที่ได้ทำการทดสอบ [8]



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบต่างของเครื่องทดสอบ [8]



รูปที่ 2.10 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาด 35 วัตต์ EE-35 FPSE [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

J. Gary Wood และ Neill Lane [9] ได้อธิบายการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระรุ่น 35 $W_{(e)}$ ในแสดงในรูปที่ 2.11 ให้มีขนาดเครื่องยนต์เล็กลงและน้ำหนักเบาและประสิทธิภาพของมากกว่าร้อยละ 30 สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานได้ 90 วัตต์ / กิโลกรัม

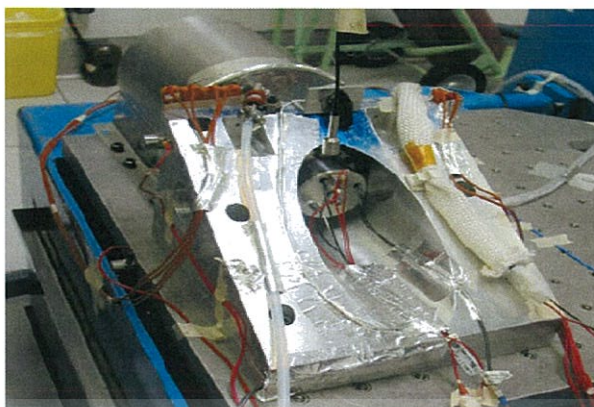


รูปที่ 2.11 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระรุ่น 35 $W_{(e)}$ [9]

ในปี ค.ศ. 2007 บริษัท Sunpower ได้พัฒนาและสร้างเครื่องยนต์ Advanced Stirling Converter (ASC) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยได้รับการสนับสนุนทางด้านเทคโนโลยีขั้นสูงจากทีมงาน NASA's Glenn Research Center (GRC) และได้รับทุนจากหน่วยงานด้านวิทยาศาสตร์ของนาซ่า ในการสร้างเครื่องยนต์มีการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเมื่อสร้างเสร็จมีทดสอบเครื่องยนต์ Advanced Stirling Converter (ASC) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยป้อนมวลที่ 1.3 กิโลกรัม ได้ไฟฟ้าที่ 80 วัตต์ จากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการแปลงสูง 38 เปอร์เซ็นต์

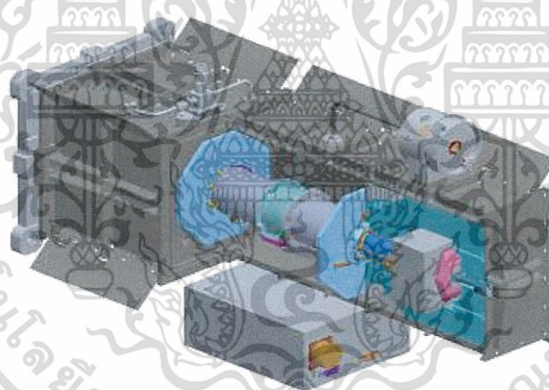


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.12 เครื่องยนต์ Advanced Stirling Converter (ASC) [10] ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การทดสอบเครื่องยนต์ Advanced Stirling Converter [11]

ด้วยข้อดีของเครื่องยนต์ ASC คือมีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูงและมีอายุการใช้งานมากกว่า 14 ปี ได้มีการนำไปติดตั้งบนยานอวกาศของนาซาดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การติดตั้งเครื่องยนต์ Advanced Stirling Converter [11]

ซึ่งในปัจจุบันทางบริษัท Sunpower, Inc ได้วางจำหน่ายเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีอยู่ 3 แบบคือ

1.แบบ CryoTel MTเวอร์ชัน 4 เครื่องยนต์มีกำลัง 5 วัตต์ ลักษณะของเครื่องยนต์มีความยาว 223 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 73 มิลลิเมตรและมีน้ำหนัก 1.95 กิโลกรัม ได้วางจำหน่ายในวันที่ 25 มีนาคม ปี 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แบบ CryoTel MT Cryocooler [12]

2.แบบ CryoTel CT เวอร์ชัน 6 เครื่องยนต์มีกำลัง 10 วัตต์ ลักษณะของเครื่องยนต์มีความยาว 260 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 83 มิลลิเมตรและมีน้ำหนัก 3.1 กิโลกรัม ได้วางจำหน่ายในเดือนเมษายนปี 2010



รูปที่ 2.16 แบบ CryoTelTM CT Cryocooler [13]

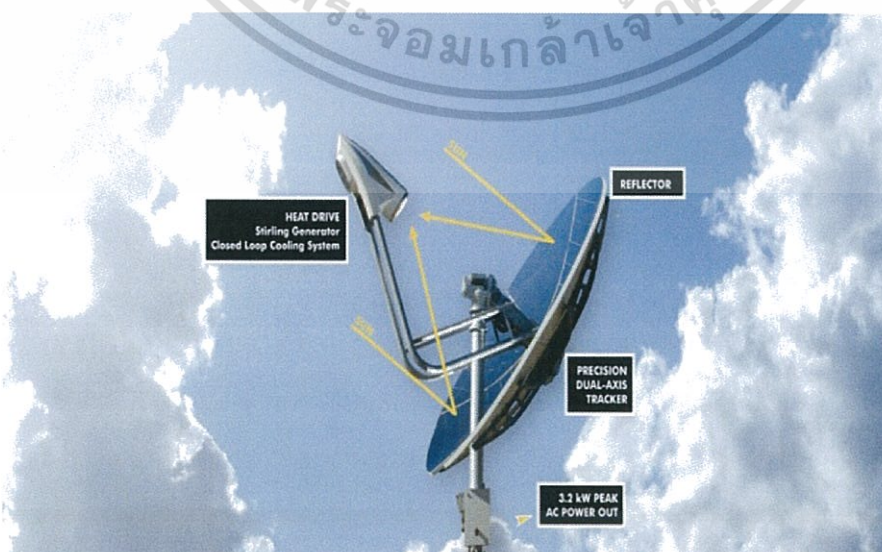
3.แบบ CryoTel® GTเวอร์ชัน 5 เครื่องยนต์มีกำลัง 15 วัตต์ ลักษณะของเครื่องยนต์มีความยาว 260 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 83 มิลลิเมตรและมีน้ำหนัก 3.1 กิโลกรัม ได้วางจำหน่ายในเดือนพฤศจิกายนปี 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

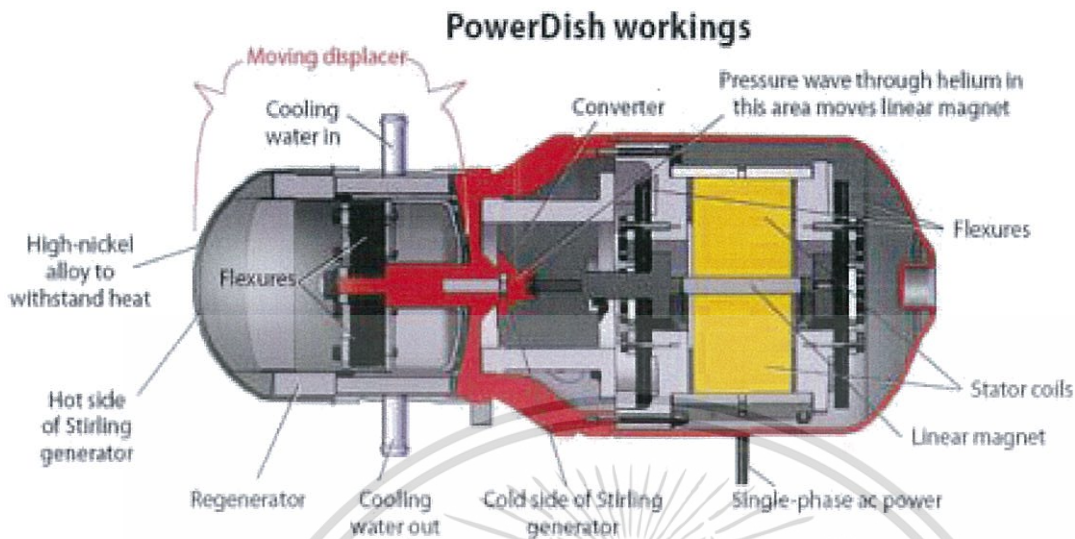


รูปที่ 2.17 แบบ CryoTel GT Cryocooler [14]

ในปี 2010 บริษัท Infinia ได้นำเสนอการพัฒนาเชิงพาณิชย์ของเครื่องยนต์ Infinia PowerDish ได้มีการติดตั้งในเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรกในรัฐแอริโซนาในเดือนกรกฎาคม บริษัท Infinia ได้มีการก่อตั้งในปี ค.ศ. 1985 ได้ดำเนินธุรกิจทางด้านการบำรุงรักษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระและระบบไฟฟ้าของเครื่องยนต์ จากนั้นไม่นานบริษัท Infinia ก็ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องยนต์ Infinia Power Dish แสดงในรูปที่ 2.18 ใช้งานร่วมกับจันรวมแสงจึงเป็นบริษัทแห่งแรกของโลกที่ใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ช่วยให้มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้นและมีราคาไม่แพงโดยเครื่องยนต์ Infinia Power Dish มีกำลัง 3.2 กิโลวัตต์ ผลิตไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 240 โวลต์และ 3 เฟส 208 โวลต์ มีประสิทธิภาพมากกว่า 24% ใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงาน ตัวเครื่องยนต์ปิดสนิทจึงทำให้มีอยู่การใช้งานมากถึง 25 ปี มีการบำรุงรักษาน้อย ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีปลอดภัยสูง ติดตั้งเข้ากับจันรวมแสงมีงานเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 เมตร สูง 6.4 เมตร [14]



เอกสารรูปที่ 2.18 การติดตั้งเครื่องยนต์ Infinia PowerDish กับจันรวมแสงขนาด 3.2 kW[14] ernerด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยนต์ Infinia PowerDish[14]



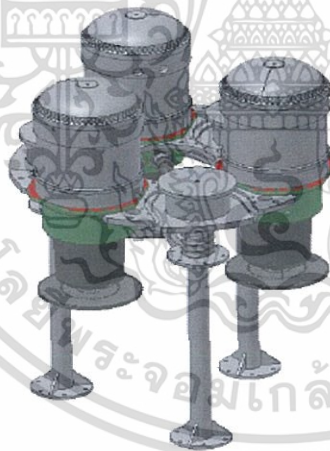
รูปที่ 2.20 เครื่องยนต์Power Dishขณะทำงาน[14]

ในปี 2012 บริษัท Infinia ได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์ Power Dish double acting free piston 30 กิโลวัตต์ ในการพัฒนาได้แบ่งออกเป็น 3 ระยะคือระยะแรกทำการออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบขนาด 30 กิโลวัตต์ โดยแบ่งเครื่องยนต์ออกเป็น 6 เครื่องยนต์แต่ละเครื่องยนต์มีกำลัง 5 กิโลวัตต์ได้แสดงในรูปที่ 2.21 การทำงานของเครื่องยนต์แบ่งออกเป็น 2 คู่ คู่ละ 15 กิโลวัตต์ได้แสดงในรูปที่ 1.22 น้ำหนักโดยประมาณของเครื่องยนต์ต้นแบบ 540 กิโลกรัมในรูปที่ 1.23 แสดงการประกอบของเครื่องยนต์ต้นแบบปีขนาด 30 กิโลวัตต์ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระยะที่ 2 จัดสร้างเครื่องยนต์ต้นแบบขนาด 30 กิโลวัตต์และทดสอบเครื่องยนต์ในห้องปฏิบัติการ ระยะที่ 3 ทำการทดสอบเครื่องยนต์ต้นแบบขนาด 30 กิโลวัตต์ในพื้นที่จริงก่อนผลิตเครื่องยนต์ขนาด 30 กิโลวัตต์ออกมาวางจำหน่าย [15]



รูปที่ 2.21 เครื่องยนต์ต้นแบบขนาดเครื่องยนต์ละ 5 กิโลวัตต์[15]

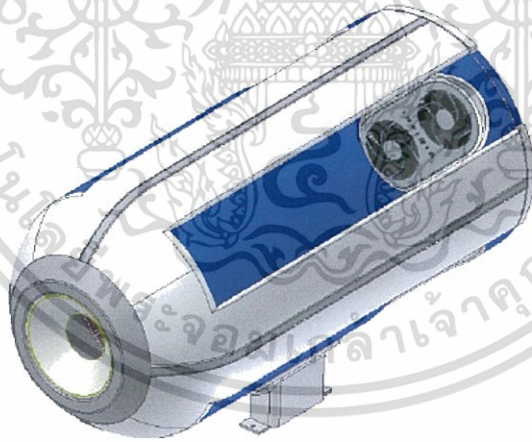


รูปที่ 2.22 การทำงานของเครื่องยนต์แบ่งออกเป็น 2 คู่ คู่ละ 15 กิโลวัตต์[15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



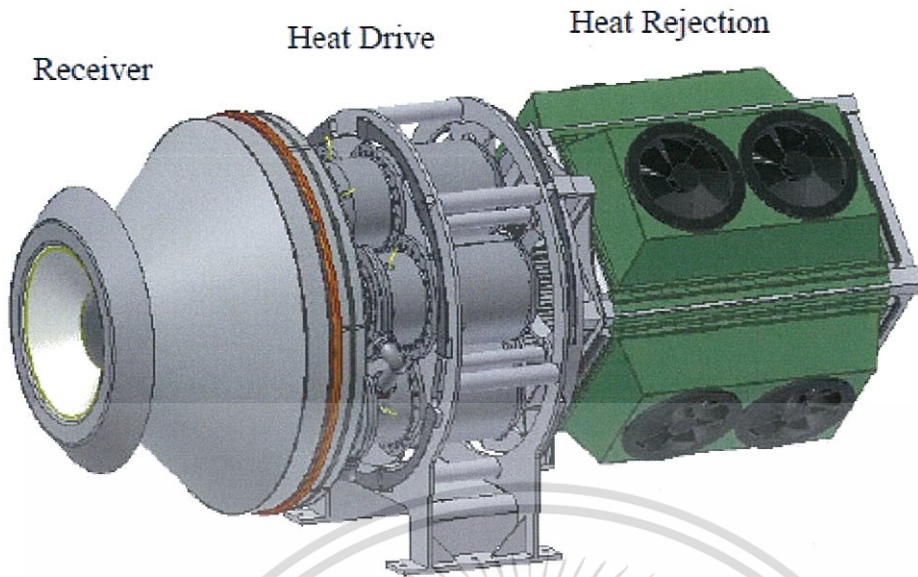
รูปที่ 2.23 การประกอบของเครื่องยนต์ันแบบขนาด 30 กิโลวัตต์[15]



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างของเครื่องยนต์ันแบบขนาด 30 กิโลวัตต์[15]

จากรูปที่ 2.24 ได้แสดงตัวอย่างของการประกอบเข้าด้วยกันของเครื่องยนต์ันแบบขนาด 30 กิโลวัตต์ที่เหมือนจริงพร้อมทดสอบกับงานรวมแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องยนต์ต้นแบบขนาด 30 กิโลวัตต์ [15]

จากรูปที่ 2.25 ได้แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์ต้นแบบ ได้แก่ Receiver , Heat Drive และ Heat Rejection

สรุปวิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายคือ การศึกษาออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิต เพื่อให้ได้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิตและข้อมูลผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระเพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบ สร้าง และทดสอบนำไปต่อยอดในการผลิตเครื่องยนต์ใช้งานได้จริงในอนาคต

บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณ

จากการศึกษาเครื่องยนต์ต้นแบบทำให้เราทราบถึงหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระและวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างเครื่องยนต์ต้นแบบ ดังนั้นผลที่ได้จากการศึกษาเครื่องยนต์ต้นแบบทำให้เราทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์ต้นแบบทำให้เราสามารถนำปัญหาที่เกิดขึ้นไปใช้ในการแก้ไขการออกแบบเครื่องยนต์ใหม่จะได้ไม่เกิดปัญหาเหมือนกับเครื่องยนต์ต้นแบบ ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการคำนวณมีแนวทางการดำเนินงานออกเป็น 7 ขั้นตอนคือ

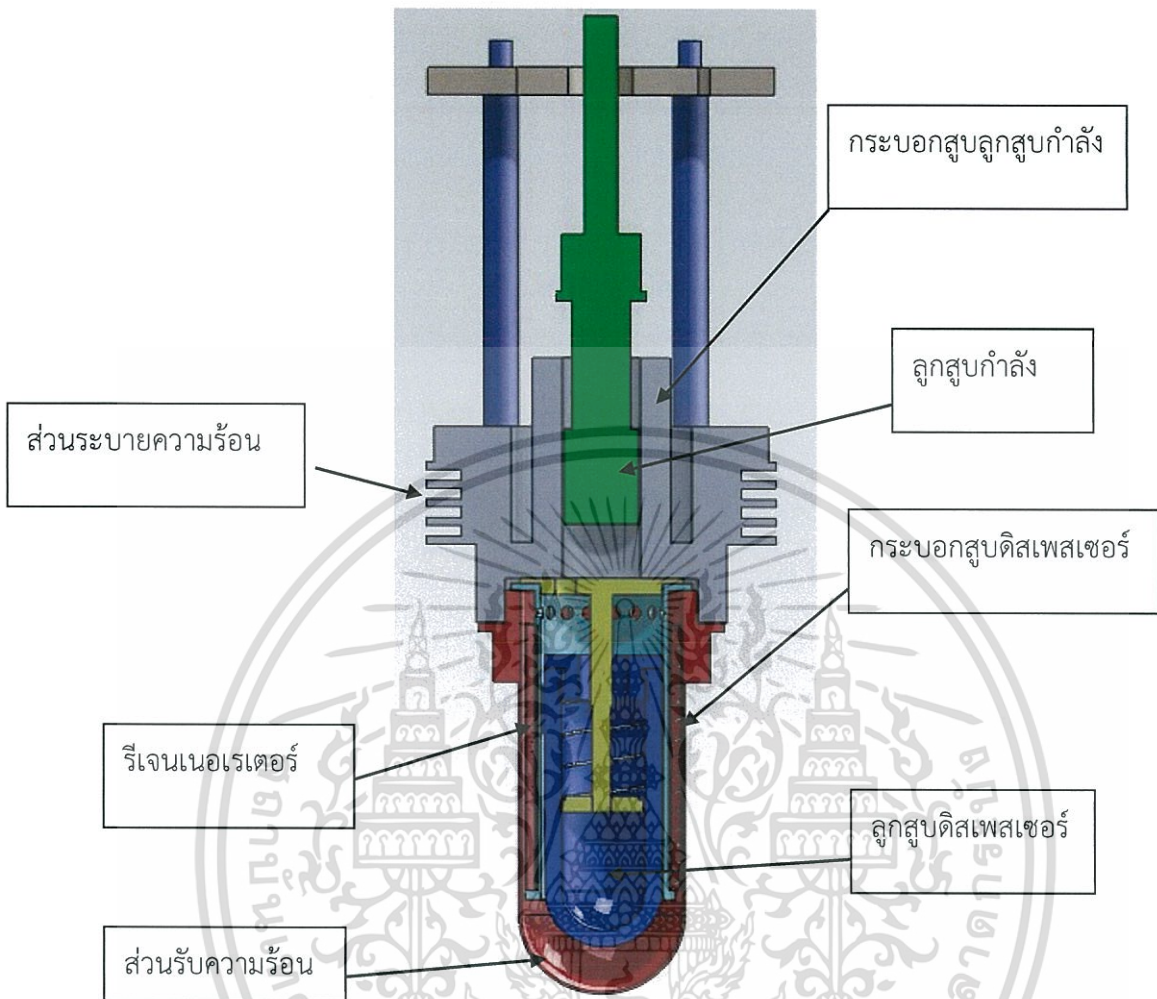
- 3.1 ลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ
- 3.2 การคำนวณขนาดของเครื่องยนต์
- 3.3 สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ
- 3.4 การคำนวณและการออกแบบครีบ
- 3.5 การคำนวณวัสดุที่จะมาทำกระบอกสูบ
- 3.6 การคำนวณหาค่าคงที่สปริงแก๊ส
- 3.7 การสันสะเทือนแบบบังคับด้วยแรงฮาร์โมนิกส์

3.1 ลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ

ในส่วนนี้จะช่วยอธิบายลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระเพื่อให้เข้าใจในส่วนลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ได้แบ่งการอธิบายออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของอุณหพลศาสตร์และส่วนของวัฏจักรสเตอร์ลิง

3.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระแสดงในรูปที่ 3.1 มีชิ้นส่วนหลักประกอบด้วยหกส่วนได้แก่



รูปที่ 3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ

- ลูกสูบดีสเพสเซอร์เคลื่อนที่ได้โดยอาศัยแหล่งความร้อนจากด้านนอกกระบอกสูบดีสเพสเซอร์ทำให้อากาศด้านใน ส่วนหัวของลูกสูบดีสเพสเซอร์ร้อนแล้วเกิดการขยายตัวของอากาศทำให้ลูกสูบดีสเพสเซอร์เคลื่อนที่ไปทางด้านเย็นโดยมีก้านของลูกสูบดีสเพสเซอร์และสปริงก๊าซอากาศเป็นตัวช่วยในการเคลื่อนที่ไปมา

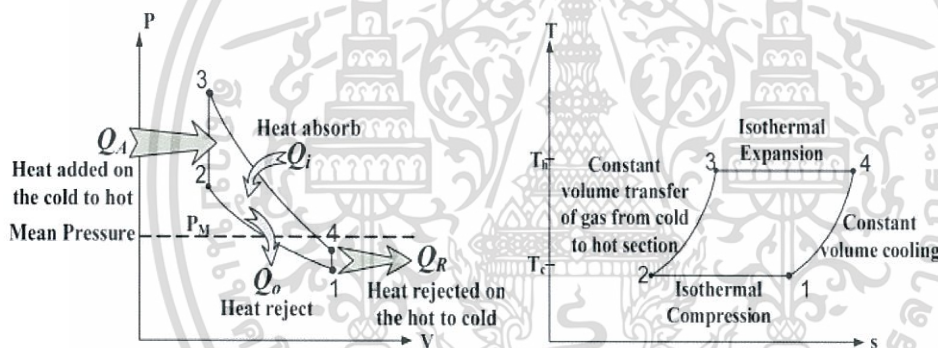
- ลูกสูบกำลังเป็นส่วนที่ผลิตกำลังของเครื่องยนต์ทำงานเมื่อแรงดันก๊าซทำงานการเปลี่ยนแปลงทำให้ลูกสูบกำลังเกิดการเคลื่อนที่ไปมาโดยอาศัยสปริงอากาศและแผ่นสปริงที่ยึดติดกับก้านของลูกสูบกำลังส่วนการผลิตกำลังได้จากตัดกันของสนามแม่เหล็กกับขดลวดทองแดงการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งก้านของลูกสูบกำลังยึดติดกับแม่เหล็กถาวรส่วนด้านข้างของแกนลูกสูบกำลังถูกม้วนด้วยขดลวดทองแดงทำในเกิดการตัดกันของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระจกอบสุบติสเพสเซอร์และกระจกอบสุบลูกสูบกำลังต่อเข้าด้วยกันอย่างนิค พื้นที่ในเครื่องยนต์จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนของพื้นที่รับความร้อนและขยายตัวของสารทำงาน และส่วนพื้นที่เย็นมีทำหน้าที่ระบายความร้อนอยู่ระหว่างลูกสูบติสเพสเซอร์ และลูกสูบกำลัง
- รีเจนเนอเรเตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บความร้อนอยู่ระหว่างลูกสูบติสเพสเซอร์และลูกสูบกำลัง
- ส่วนรับความร้อนอยู่บริเวณหัวกระจกอบสุบติสเพสเซอร์ใช้สำหรับให้ความร้อนกับสารทำงาน
- ส่วนระบายความร้อนจะถูกใช้สำหรับระบายความร้อนของก๊าซทำงาน

3.1.2 วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ (The Ideal Stirling Cycle)

วัฏจักรสเตอร์ลิงประกอบด้วยสี่กระบวนการทำงานเริ่มจากกำหนดให้ลูกสูบติสเพสเซอร์ที่อยู่ในส่วนปริมาตรขยายอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบนและลูกสูบกำลังที่อยู่ในส่วนปริมาตรอัดอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายล่าง ในช่วงนี้จะมีปริมาตรมากที่สุดดังนั้นความดันและอุณหภูมิจะมีค่าน้อยที่สุด ดังรูป 3.2 (ก) บนแผนภาพ P-V และ T-S จากรูป (ข) ได้อธิบายของแต่ละกระบวนการดังต่อไปนี้(ภาคผนวก ก)



(ก) แผนภาพ P-V (ความดัน-ปริมาตรจำเพาะ)

(ข) แผนภาพ T-S (อุณหภูมิ-เอนโทรปี)

รูปที่ 3.2 วัฏจักรสเตอร์ [17]

กระบวนการอัด 1-2

เริ่มต้นที่ 1-2 ลูกสูบกำลังอยู่ในส่วนของปริมาตรอัดจะค่อยๆเคลื่อนที่มายู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบนส่วนลูกสูบติสเพสเซอร์ ในส่วนปริมาตรขยายอยู่นิ่ง สารทำงานจะถูกอัดในส่วนปริมาตรอัดทำให้ความดันเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิจะคงที่เพราะมีการคายความร้อนจากปริมาตรอัดไปยังสิ่งแวดล้อม (ภาคผนวก ก) [17]

กระบวนการขยายตัว 2-3

เริ่มต้นที่ 2-3 ลูกสูบติสเพสเซอร์ที่อยู่ในส่วนปริมาตรอัดและปริมาตรขยายจะเคลื่อนที่พร้อมๆกันโดยลูกสูบกำลังที่อยู่ในปริมาตรอัดจะเคลื่อนที่ไปยังรีเจเนอเรเตอร์ (ลูกสูบที่อยู่ในปริมาตรขยายจะเคลื่อนที่ออกไปจากรีเจเนอเรเตอร์) ทำให้ปริมาตรในขบวนการนี้คงที่ สารทำงานจะเคลื่อนที่จากส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรอัดผ่านรีเจเนอเรเตอร์มายังส่วนปริมาตรขยาย ซึ่งเดิมมีอุณหภูมิต่ำจะค่อยเปลี่ยนเป็นอุณหภูมิสูงโดย จะได้รับการถ่ายเทความร้อนจากรีเจเนอเรเตอร์ ขบวนการนี้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาตรคงที่และความดันเพิ่มขึ้น

กระบวนการอัด 3-4

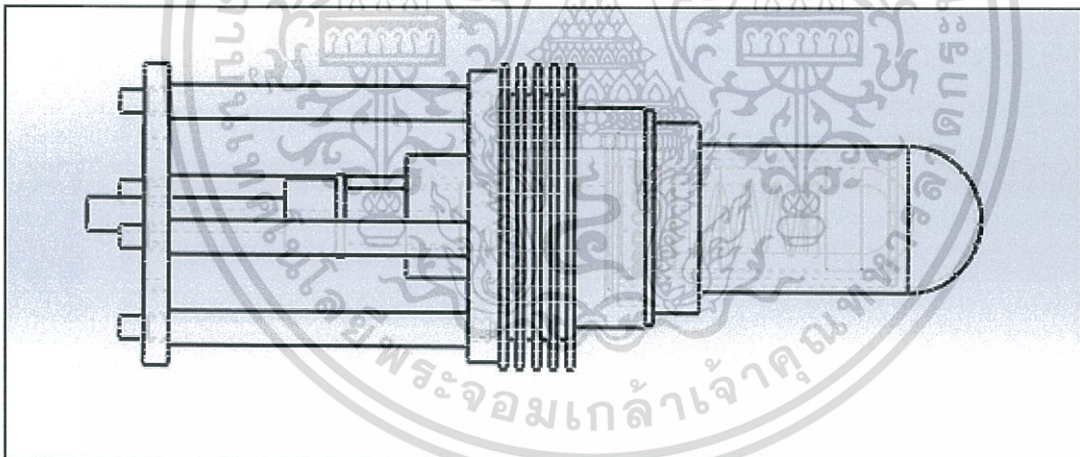
เริ่มต้นที่ 3-4 ลูกสูบดีสเพลสเซอร์ที่อยู่ในปริมาตรขยายค่อยๆเคลื่อนตัวออกจากรีเจเนอเรเตอร์มายังศูนย์ตายล่าง ขณะที่ลูกสูบกำลังในส่วนอัดอยู่นิ่งที่ศูนย์ตายบน (ติดกับรีเจเนอเรเตอร์) ขบวนการนี้ความดันลดลง ขณะที่ปริมาตรสูงขึ้น อุณหภูมิมีค่าคงที่เพราะมีการได้รับความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนภายนอก

กระบวนการขยาย 4-1

การสุดท้ายในวัฏจักรเริ่มต้นที่ 4-1 ในระหว่างที่ลูกสูบทั้งสองกำลังเคลื่อนที่กลับพร้อมๆ กัน สารทำงานจะเคลื่อนที่ผ่านรีเจเนอเรเตอร์ (ปริมาตรคงที่) ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากสารทำงานสู่รีเจเนอเรเตอร์ ทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิลดลงจนอุณหภูมิต่ำสุด ความร้อนที่ถูกถ่ายเทสู่รีเจเนอเรเตอร์นั้นจะถูกใช้ในขบวนการ (2-3) เพื่อถ่ายเทความร้อนสู่สารทำงานอีกครั้ง

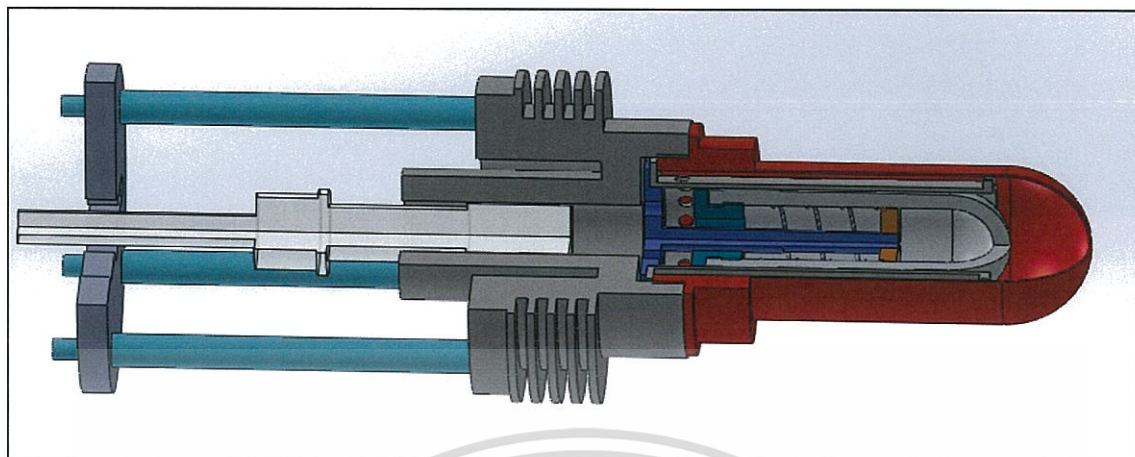
3.2 การคำนวณขนาดของเครื่องยนต์

การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระนั้นเราจะเขียนแบบเป็นภาพ 2 มิติก่อน เพื่อตรวจสอบขนาดและกลไกว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงแบบเครื่องยนต์ 2 มิติ

จากนั้นเมื่อแก้ไขจนได้ขนาดที่เหมาะสมแล้วจึงทำภาพ 2 มิติ ให้เป็นภาพ 3 มิติ เพื่อนำแบบไปทำการวิเคราะห์ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ก่อนสร้างชิ้นงานจริงดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงแบบเครื่องยนต์ 3 มิติ

การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถประมาณปริมาตรของเครื่องยนต์ได้จากสมการของ นาย วิลเลียม เบลล์ (Mr.William Beale) โดยใช้ค่าคงที่ที่มีความต่างอุณหภูมิระหว่าง 423 K และ 298 K

3.2.1 การออกแบบ Power Piston และระยะชัก

เลือกใช้อลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.7 cm และกำหนดระยะชักที่ 4 c m สมการคำนวณปริมาตรการกวาด หรือ Swept volume

$$\text{Swept volume } V_p = \frac{\pi D^2}{4} x \text{ stroke} \quad (3.1)$$

$$\text{Swept volume } V_p = \frac{\pi 2.7^2}{4} x 4 \quad (3.2)$$

$$\text{Swept volume } V_p = 22.9 \text{ cm}^3$$

3.2.2 การออกแบบ Displacer และระยะชัก

เลือกใช้อลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 cm. และระยะชัก 2.1cm.

$$\text{Swept volume } V_p = \frac{\pi D^2}{4} x \text{ stroke} \quad (3.3)$$

$$\text{Swept volume } V_p = \frac{\pi 4.4^2}{4} x 2.1 \quad (3.4)$$

$$\text{Swept volume } V_p = 31.93 \text{ cm}^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การหาอัตราส่วนการอัด ในสมการ

$$\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (3.5)$$

V_{\max} = อัตราส่วนปริมาตรสูงสุด

V_{\min} = อัตราส่วนปริมาตรต่ำสุด

ได้อัตราส่วนการอัดระหว่าง displacer กับ power piston $\frac{31.93 \text{ cm}^3}{22.9 \text{ cm}^3} = 1.4 : 1$

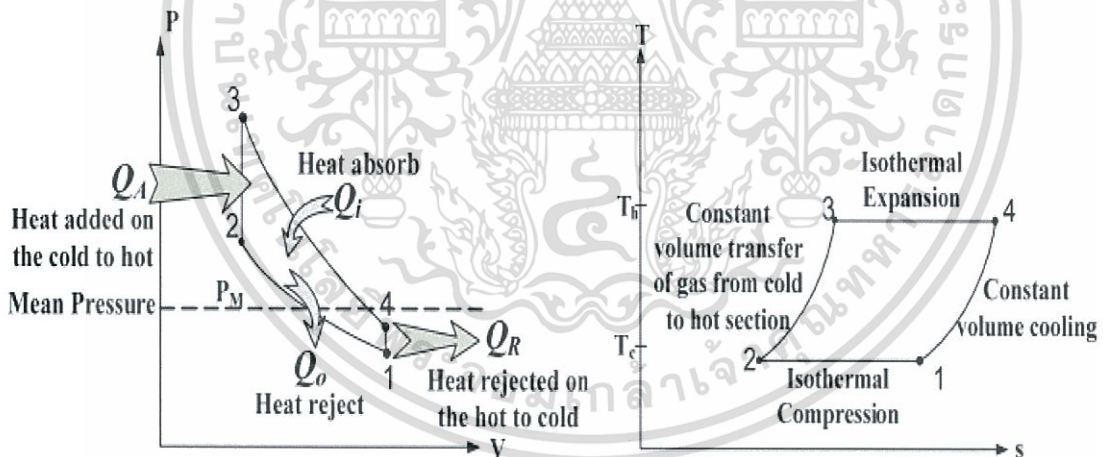
3.3 สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

การคำนวณนั้นเราได้มีการกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องยนต์และมีการกำหนดค่าความดันที่ใช้ในการทำงานของเครื่องยนต์ และได้มีการแสดงกราฟ P-V และ T- S ในรูปที่ 3.5

อุณหภูมิต่ำสุดในระบบ $25^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$

อุณหภูมิสูงสุดในระบบ $150^\circ\text{C} = 423 \text{ K}$

ความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ (atm) ที่ $25^\circ\text{C} = 101.325 \text{ kPa}$



รูปที่ 3.5 กราฟ P-V และ T- S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การหาปริมาตรสูงสุด $V_{\max} = V_1 = V_d + V_p$

$$= \left[\left(\frac{\pi 4.4^2}{4} \right) - \left(\frac{\pi 1.2^2}{4} \right) \right] 2.1 + \left[\left(\frac{\pi 2.7^2}{4} \right) - \left(\frac{\pi 1.8^2}{4} \right) \right] 4 = 42.286 \text{ cm}^3$$

3.3.2 การหาปริมาตรต่ำสุด $V_{\min} = V_2 = V_d$

$$= \left[\left(\frac{\pi 4.4^2}{4} \right) - \left(\frac{\pi 1.2^2}{4} \right) \right] = 2.1 = 29.526 \text{ cm}^3$$

ความเร็วรอบ = 720 rpm

อัตราส่วนการอัด = $V_1 / V_2 = V_4 / V_3$

$$= 1.43$$

เมื่อ $r_d = 4.4 \text{ cm}$, $r_p = 2.7 \text{ cm}$

3.3.3 กระบวนการที่ 1-1 เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่

$$PV = RT$$

$$V_1 = RT_1 / P_1$$

$$V_{\text{อากาศ}} = RT_{\text{อากาศ}} / P_{\text{อากาศ}}$$

$$V_1 = V_{\text{อากาศ}}$$

$$P_1 = (T_1 \times P_{\text{อากาศ}}) / T_{\text{อากาศ}}$$

$$P_1 = (101.325 \times 298) / 298$$

$$P_1 = 101.325 \text{ kPa}$$

3.3.4 กระบวนการที่ 1-2 เป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่

$$T_1 = P_1 V_1 / R$$

$$T_2 = P_2 V_2 / R$$

$$T_1 = T_2$$

$$P_2 = P_1 V_1 / V_2$$

$$P_2 = 101.325 \times 1.43$$

$$P_2 = 144.894 \text{ kPa}$$

เมื่อ $V_1 / V_2 = 1.4$

3.3.5 กระบวนการที่ 2-3 เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่

$$V_2 = RT_2 / P_2$$

$$V_3 = RT_3 / P_3$$

$$V_2 = V_3$$

$$P_3 = (T_3 \times P_2) / T_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_3 = (144.894 \times 423) / 298$$

$$P_3 = 205.672 \text{ kPa}$$

3.3.6 กระบวนการที่ 3-4 เป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่

$$T_3 = P_3 V_3 / R$$

$$T_4 = P_4 V_4 / R$$

$$T_3 = T_4$$

$$P_4 = P_3 V_3 / V_4$$

$$P_4 = 205.672 / 1.43$$

$$P_4 = 143.82 \text{ kPa}$$

เมื่อ $V_4 / V_3 = 1.43$

3.3.7 มวลอากาศ M_a

เมื่อ $V_3 = RT_3 / P_3$

$$M_a = V_1 / v_1$$

$$V_3 = (0.287 \times 423) / 205.672$$

$$V_3 = 0.59 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_4 / V_3 = 1.43$$

จาก เมื่อ $V_4 = V_1 = 1.43 \times v_3$

$$v_1 = 1.43 \times 0.59$$

$$v_1 = 0.35 \text{ m}^3/\text{kg}$$

จาก จะได้ $M_a = V_1 / v_1$

$$M_a = (42.286 \times 10^{-6}) / 0.35$$

$$M_a = 0.121 \text{ m}^3/\text{kg}$$

3.3.8 ความร้อนที่ได้รับจากสิ่งแวดล้อม Q_{in}

$$Q_{in} = Q_{34}$$

$$Q_{in} = T \Delta s$$

เมื่อ $\Delta s = M_a R \ln(V_4 / V_3)$

จะได้ $Q_{in} = M_a R T_h \ln(V_4 / V_3)$

$$Q_{in} = (1.21 \times 10^{-4}) \times 0.287 \times 423 \times \ln(1.43)$$

$$Q_{in} = 0.008 \text{ J}$$

3.3.9 ความร้อนที่ออกสู่สิ่งแวดล้อม Q_{out}

$$Q_{out} = Q_{12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{\text{out}} = T \Delta s$$

เมื่อ
จะได้

$$\Delta s = M_a R \ln(v_1/v_2)$$

$$Q_{\text{out}} = M_a R T_L \ln(V_1/V_2)$$

$$Q_{\text{out}} = (1.24 \times 10^{-4}) \times 0.287 \times 298 \times \ln(1.78)$$

$$Q_{\text{out}} = 0.0061 \text{ J}$$

3.3.10 งานที่ได้

$$W_{\text{net}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}$$

$$W_{\text{net}} = 0.008 - 0.006$$

$$W_{\text{net}} = 0.002 \text{ J}$$

3.3.11 กำลังงานที่ได้

$$P = W_{\text{net}} \times \text{speed}$$

$$P = 0.002 \times (720/60)$$

$$P = 0.012 \text{ J/s}$$

3.3.12 ประสิทธิภาพทางความร้อน

$$\eta_{\text{th}} = 1 - (T_L / T_h)$$

$$\eta_{\text{th}} = 1 - (298/423)$$

$$\eta_{\text{th}} = 0.307 \text{ (30.7\%)}$$

3.3.13 Thermal efficiency

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{Power output}}{\text{Heat supplied}} = 0.5 \left(\frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} \right) \\ &= 0.5 \left(\frac{423 - 298}{423} \right) \\ &= 0.147 \text{ หรือ } 14.7 \% \end{aligned}$$

3.3.14 Beale number

$$P = 0.0041 p \times f \ V_p$$

$$= 0.0015(1) \times 6.42 \times 22.9$$

$$= 0.602 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การคำนวณและการออกแบบ Fin

การระบายความร้อนของเครื่องยนต์เป็นเรื่องสำคัญมากในการออกแบบเครื่องยนต์ต้องมีการคำนวณออกแบบที่ดี

$$q_t = N\eta_f h 2\pi (r_{2c}^2 - r_{1c}^2) (T_b - T_\infty) + h(H - N_t)(2\pi r_t)(T_b - T_\infty)$$

$$N = 12$$

$$t = 1.5 \text{ mm} = 0.0015 \text{ m}$$

$$r_2 = 20.75 \text{ mm} = 0.02075 \text{ m}$$

$$r_{2c} = r_2 + \frac{t}{2} = 0.02075 + \frac{0.0015}{2} = 0.0215 \text{ m}$$

$$r_1 = 12.75 \text{ mm} = 0.01275 \text{ m}$$

$$L = 8 \text{ mm} = 0.008 \text{ m}$$

$$L_c = L + \frac{t}{2} = 0.008 + \frac{0.0015}{2} = 0.00875 \text{ m}$$

$$A_p = L_c \times t = 0.00875 \times 0.0015 = 0.000013125 \text{ m}^2$$

$$H = 42 \text{ mm} = 0.042 \text{ m}$$

$$\frac{r_{2c}}{r_1} = \frac{0.0215}{0.01275} = 1.69$$

$$T_b = 323 \text{ K}$$

$$T_\infty = 303 \text{ K}$$

$$K = 238.7 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

$$L_c^{\frac{3}{2}} (h/kA_p)^{\frac{1}{2}} = 0.00875^{\frac{3}{2}} (25/238.7 \times 0.000013125)^{\frac{1}{2}} = 0.073$$

$$\eta_f = 98\% = 0.98$$

แทนค่าหา q_t

$$\begin{aligned} q_t &= 12 \times 0.98 \times 25 \times 2 \times \pi \times (0.0215^2 - 0.01275^2) (323 - 303) + 25 \times \\ &\quad (0.042 - (12 \times 0.0015)) (2 \times \pi \times 0.01275) (323 - 303) \\ &= 12 \text{ W} \end{aligned}$$

ดังนั้น Fin จะสามารถดึงความร้อนออกได้ 12 W

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$= 1 - \left(\frac{338}{923} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สร้างขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

$$0.6 = 1 - \frac{12}{Q_{in}}$$

$$Q_{in} = 30 \text{ W}$$

3.5 การคำนวณวัสดุที่จะมาทำกระบอกสูบ

กระบอกสูบควรมีความหนาเพียงพอที่จะรับความดันที่เกิดขึ้นขณะเครื่องยนต์ทำงานได้ สามารถคำนวณความหนาของผนังกระบอกสูบจากสูตรง่าย ๆ ดังนี้

$$t = \frac{pd}{2\sigma}$$

โดยที่ t = ความหนาของผนังกระบอกสูบ

p = ความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์

d = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบ

σ = ค่าความดันอนุญาตสูงสุด

ค่าความดันอนุญาตสูงสุดที่ใช้ในสูตรนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาสร้างผนังกระบอกสูบ โดยเฉลี่ยมักจะประมาณค่าความดันอนุญาตสูงสุดเท่ากับ 0.8 เท่ากับความดันจุดครากของโลหะนั้นๆ ช่วงความดันครากสำหรับโลหะชนิดต่างๆ อยู่ระหว่าง 1380- 10,340 บาร์ (20,000 – 150,000 ปอนด์/ ตร.นิ้ว) และยังมีค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิด้วย ในการออกแบบที่ดีควรจะต้องคำนึงถึงระดับอุณหภูมิสูงสุดของเครื่องยนต์สามารถทำได้ และมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของโลหะชนิดต่างๆ เพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกความหนาผนังกระบอกสูบให้ปลอดภัยที่สุด และในบางครั้งอาจจะต้องมีการใช้โลหะผสม เช่น นิกเคิล และโครเมียม ทำผนังกระบอกสูบส่วนที่ร้อนมากๆ เพื่อให้ได้ความแข็งแรงตามต้องการ

การออกแบบต้องพยายามหลีกเลี่ยงโครงสร้างที่มีการหักมุมอย่างรวดเร็วเพราะบริเวณนั้นจะเกิดความดันมาก กว่าความเฉลี่ยหลายเท่า จึงเป็นจุดอ่อนที่จะเกิดการเสียหายได้ง่าย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า STRESS CONCENTRATION โดยเฉพาะงานที่ต้องใช้ในขณะอุณหภูมิสูงๆ เช่น กระบอกสูบดีเซลเทอร์โบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เขาจะพยายามไม่ทำให้หัวกระบอกสูบเป็นหน้าตัดธรรมดา แต่จะทำเป็นรูปโค้งหรือรูปโดมด้วยเหตุผลนี้ ตัวลูกสูบหรือดีเซลเทอร์โบจึงมีส่วนหัวที่โค้งตามรูปของผนังตอนบนของกระบอกสูบ เพื่อลดปริมาตรช่องว่างให้น้อยลง ในการทำโดมที่กระบอกสูบและ ดีเซลเทอร์โบนั้นเป็นการยากมากและมีราคาแพงด้วย จึงต้องนำมาคำนึงในการออกแบบด้วย

3.6 การคำนวณหาค่าคงที่สปริงแก๊ส

การเคลื่อนที่ของลูกสูบเคลื่อนที่ด้วย ระยะชักเท่ากับ 4 cm ไปด้านซ้ายและขวาด้านละ 2.7 cm จากจุดสมดุล โดยที่จุดสมดุลจะมีความดันทั้งสองด้านเท่ากันคือ 1 atm หรือ 101,325 Pa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(101,325)(146.12) = P_{A3}(157.57)$$

จะได้

$$P_{A3} = 93,962 Pa$$

คิดค่าคงที่ของสปริงแก๊สขณะลูกสูบเคลื่อนที่จาก $State1 \rightarrow State2$ ดังนี้
เมื่อลูกสูบเลื่อนไปทาง A ค่า $P_A > P_B$ มีแรงสุทธิดันกลับไปทาง B ดังนี้

$$P_{A2-B} = P_{A2} - P_B$$

$$P_{A2-B} = 109,939 - 101,325$$

$$P_{A2-B} = 8,614 Pa$$

เนื่องจากลูกสูบกำลังมีพื้นที่เท่ากับ

$$A_p = \frac{\pi(D_p^2)}{4}$$

$$A_p = \frac{\pi(0.027^2)}{4}$$

$$A_p = 0.000573 m^2$$

แรงที่กระทำต่อลูกสูบเท่ากับ

$$F_{A2-B} = P_{A2-B} A_p$$

$$F_{A2-B} = (8614)(0.000573)$$

$$F_{A2-B} = 4.93 N$$

จะได้ค่าคงที่สปริงเท่ากับ

$$k_{g1} = \frac{F_{A2-B}}{(S_p / 2)}$$

$$k_{g1} = \frac{4.93}{(0.04 / 2)}$$

$$k_{g1} = 246.5 N / m$$

คิดค่าคงที่ของสปริงแก๊สขณะลูกสูบเคลื่อนที่จาก $State1 \rightarrow State3$ ดังนี้
เมื่อลูกสูบเลื่อนไปทาง B ค่า $P_B > P_A$ มีแรงสุทธิดันกลับไปทาง A ดังนี้

$$P_{B-A3} = P_B - P_{A3}$$

$$P_{B-A3} = 101,325 - 93,962$$

$$P_{B-A3} = 7,363 Pa$$

แรงที่กระทำต่อลูกสูบเท่ากับ

$$F_{B-A3} = P_{B-A3} A_p$$

$$F_{B-A3} = (7,363)(0.000573)$$

$$F_{B-A3} = 4.21 N$$

จะได้ค่าคงที่สปริงเท่ากับ

สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_{g2} = \frac{F_{B-A3}}{(s_p / 2)}$$

$$k_{g2} = \frac{4.21}{(0.04 / 2)}$$

$$k_{g2} = 210.95 \text{ N / m}$$

นำมาหาค่าสปริงแก๊สเฉลี่ยได้เท่ากับ

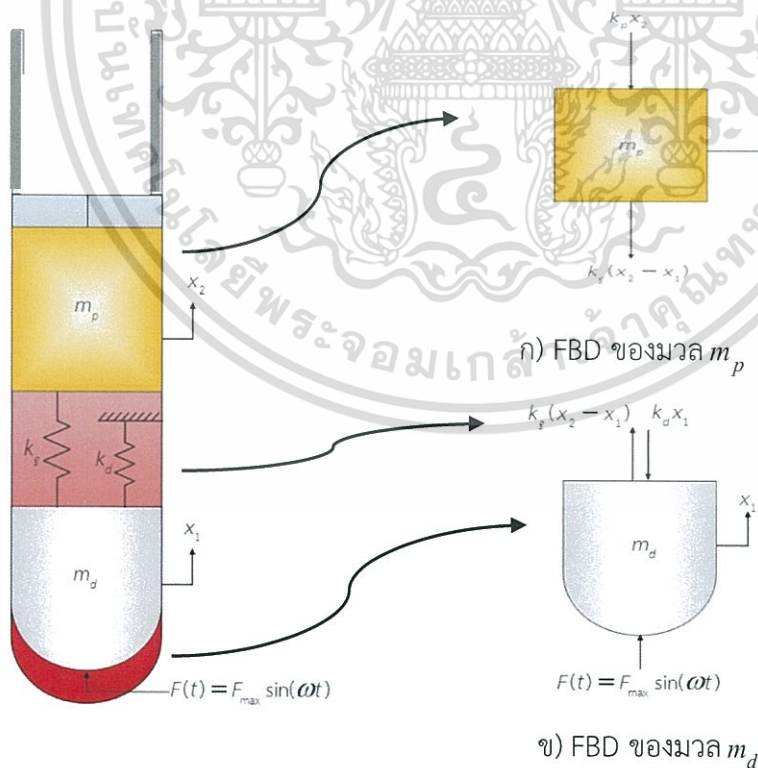
$$k_g = \frac{k_{g1} + k_{g2}}{2}$$

$$k_g = \frac{246.5 + 220.95}{2}$$

$$\therefore k_g = 242.72 \text{ N / m}$$

3.7 การสั่นสะเทือนแบบบังคับด้วยแรงฮาร์โมนิกส์

พิจารณาการสั่นสะเทือนแบบบังคับด้วยแรงฮาร์โมนิกส์ในรูปที่ 3.7 ด้วยแรง $F(t) = F_{\max} \sin(\omega t)$ กระทำต่อมวล m_d ทำให้มวลทั้งสองสั่นสะเทือนใน 2 ระดับชั้นความเร็วในพิกัด x_1 และ x_2 ของมวล m_d และ m_p ตามลำดับโดยที่ $x_2 > x_1$ จะเขียน Free Body Diagram (FBD) ของแต่ละมวลดังภาพ (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันในแต่ละมวลจะพบว่า



รูปที่ 3.7 การสั่นสะเทือนแบบบังคับของระบบที่ไม่มี การหน่วงใน 2 ระดับชั้นความเร็วภายใต้แรงฮาร์โมนิกส์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[\uparrow \sum F_x = m\ddot{x}]$$

$$\text{มวล } m_d; F_{\max} \sin(\omega t) - k_d x_1 + k_g (x_2 - x_1) = m_d \ddot{x}_1$$

จัดสมการใหม่ จะได้

$$m_d \ddot{x}_1 + (k_d + k_g) x_1 - k_g x_2 = F_{\max} \sin(\omega t) \quad (3.7)$$

เนื่องจากแรงภายนอกกระทำในรูปของฟังก์ชันฮาร์โมนิกส์ผลตอบสนอง x_1 และ x_2 จึงกำหนดให้มีความถี่เดียวกับแรงนั้น ดังนี้

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t), \quad x_2 = A_2 \sin(\omega t)$$

เมื่อทำการหาอนุพันธ์อันดับสองของผลตอบสนองได้ ดังนี้

$$\ddot{x}_1 = -\omega^2 A_1 \sin(\omega t)$$

แทนค่า x_1 และ \ddot{x}_1 ลงในสมการ (2.8) เพื่อใช้หาค่าคงที่สปริง k_d ได้ดังนี้

$$m_d (-\omega^2 A_1 \sin(\omega t)) + (k_d + k_g) A_1 \sin(\omega t) - k_g A_1 \sin(\omega t) = F_{\max} \sin(\omega t) \quad (3.8)$$

$$m_d (-\omega^2 A_1) + (k_d + k_g) A_1 - k_g A_1 = F_{\max}$$

$$(k_d + k_g) A_1 = F_{\max} + k_g A_1 + m_d \omega^2 A_1$$

$$k_d + k_g = \frac{F_{\max} + k_g A_1 + m_d \omega^2 A_1}{A_1}$$

$$k_d = \left(\frac{F_{\max} + k_g A_1 + m_d \omega^2 A_1}{A_1} \right) + k_g \quad (3.9)$$

เมื่อ

$$m_d = 0.1325 \text{ kg}$$

$$D_d = 0.05 \text{ m}$$

$$A_d = \frac{\pi D_d^2}{4} = 0.0015 \text{ m}^2$$

$$P_{\max} = 302,920 \text{ Pa}$$

$$F_{\max} = P_{\max} A_d = 454.38 \text{ N}$$

$$f = 12 \text{ Hz}$$

$$\omega = 2\pi f = 75.4 \text{ rad/s}$$

$$k_g = 242.72 \text{ N/m}$$

$$A_1 = 0.0027 \text{ m}$$

เมื่อนำค่าต่างๆที่เราทราบมาแทนค่าในสมการ (3.9) จะทำให้ได้ค่าคงที่สปริง k_d ดังต่อไปนี้

$$k_d = 114833.47 \text{ N/m}$$

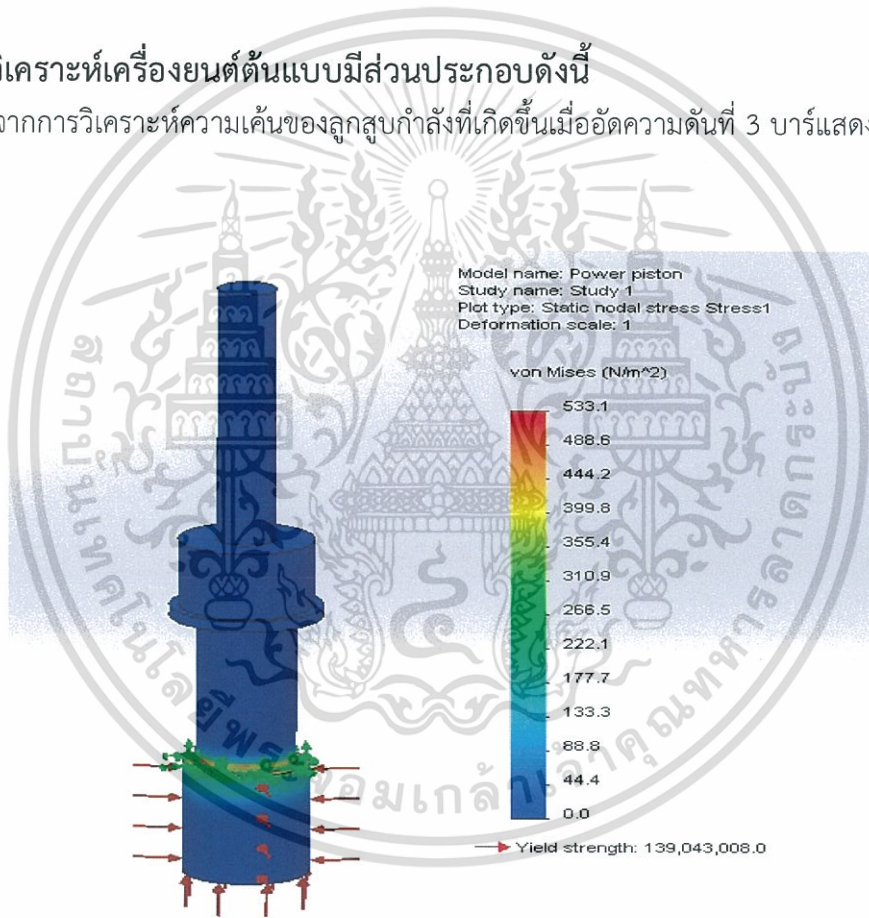
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การวิเคราะห์เครื่องยนต์ต้นแบบ

จากการศึกษาออกแบบและคำนวณขนาดของเครื่องยนต์นำมาเขียนแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Works Explorer 2012 และทำการวิเคราะห์ลูกสูบกำลังลูกสูบดีเซลเพสเซอร์ เสื้อสูบดีเซลเพสเซอร์ ครอบลูกสูบดีเซลเพสเซอร์และเสื้อสูบของลูกสูบ วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปทำลูกสูบกำลังทำจากซูเปอร์ลีน (Superlene Nylon 6) ส่วนลูกสูบดีเซลเพสเซอร์และเสื้อสูบของลูกสูบทำมาจากอลูมิเนียม 7075 ตารางคุณสมบัติวัสดุแสดงใน(ภาคผนวก ค.1) และเสื้อสูบดีเซลเพสเซอร์และครอบลูกสูบดีเซลเพสเซอร์ทำจากสแตนเลส SK 304 ตารางคุณสมบัติวัสดุแสดงใน(ตารางภาคผนวก ค.2)

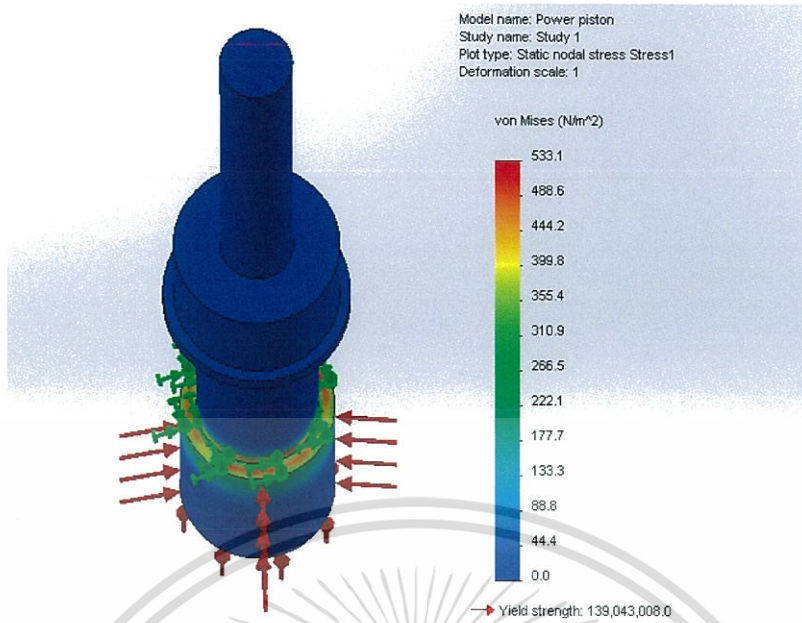
การวิเคราะห์เครื่องยนต์ต้นแบบมีส่วนประกอบดังนี้

4.1 ผลจากการวิเคราะห์ความเค้นของลูกสูบกำลังที่เกิดขึ้นเมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์แสดงในรูปที่ 4.1-4.2



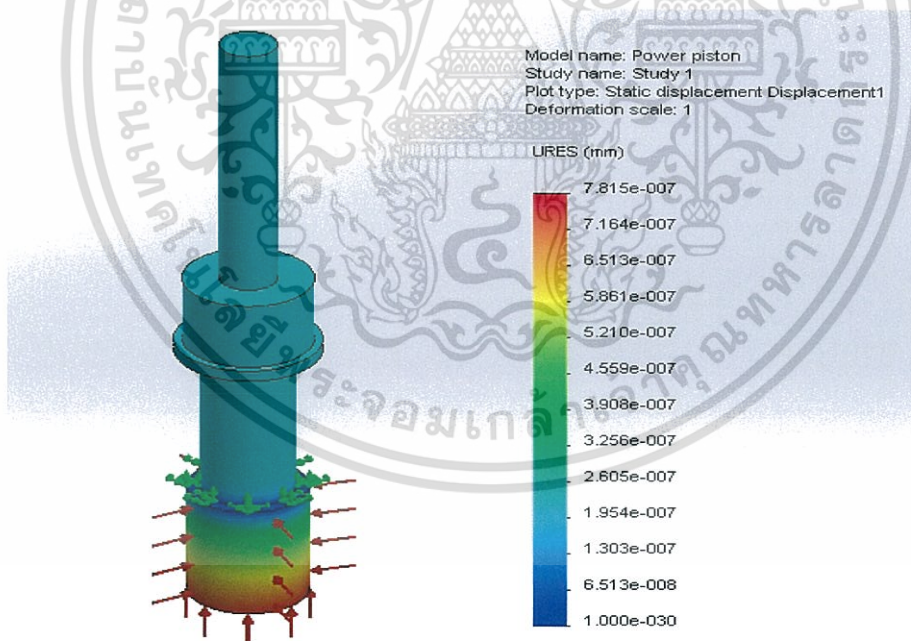
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ความเค้นของลูกสูบกำลังมองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



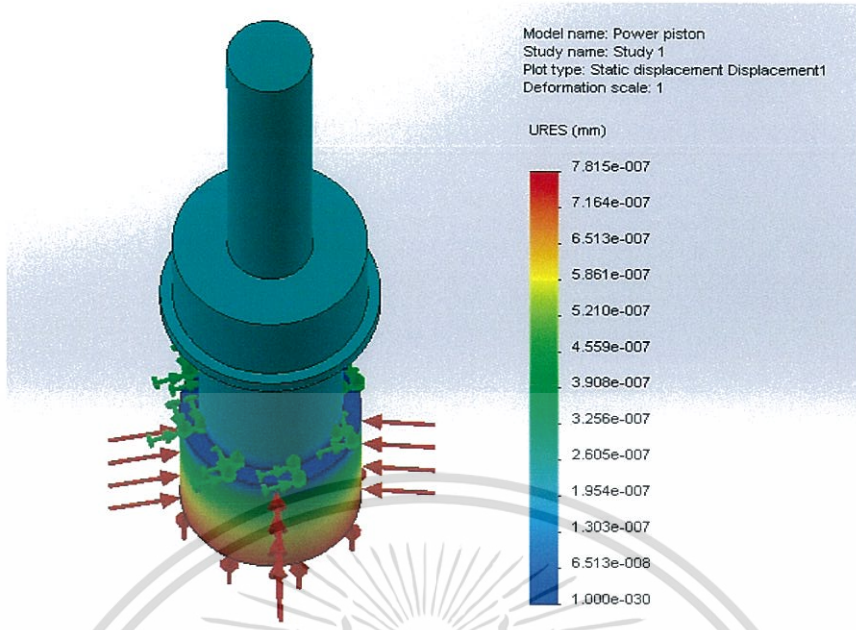
รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ความเค้นของลูกสูบกำลังมองจากด้านบน

4.2 ผลจากการวิเคราะห์ Displacement ที่เกิดขึ้นกับลูกสูบกำลังเมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์ดัง
แสดงในรูปที่ 4.3 - 4.4



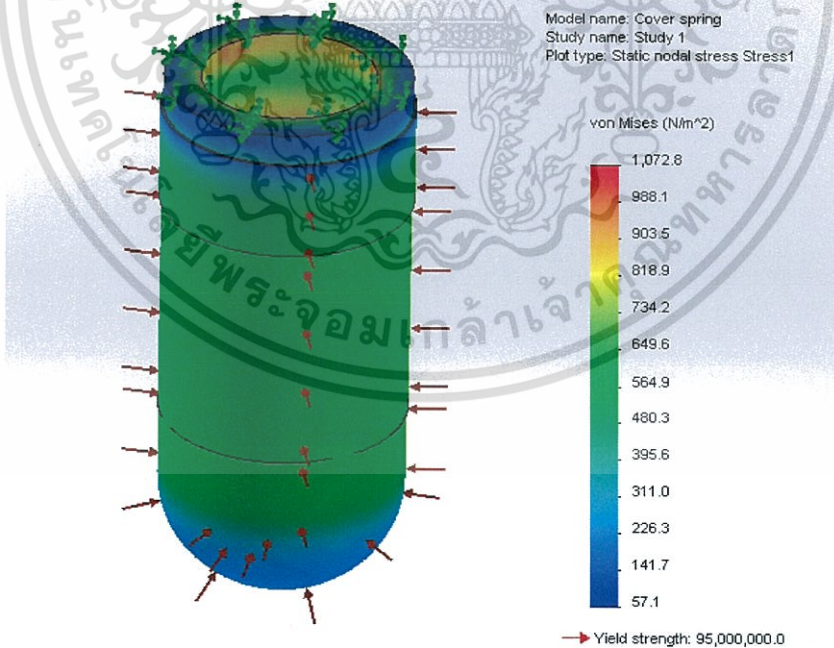
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ Displacement ของลูกสูบกำลังมองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



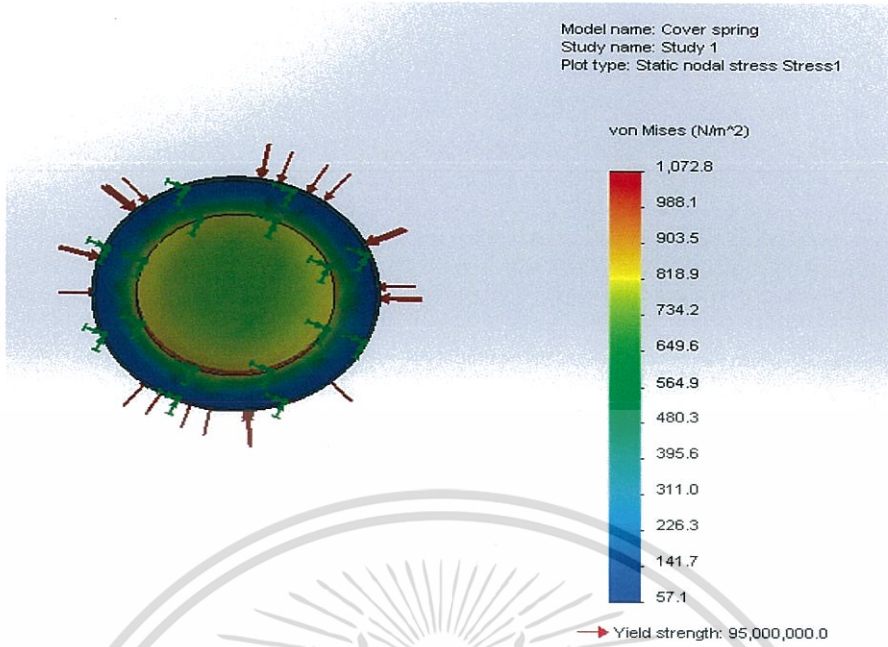
รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ Displacement ของลูกสูบกำลังมองจากด้านบน

4.3 ผลจากการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับลูกสูบดีเซลเพอร์บเมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์ ดังแสดง
 ในรูปที่ 4.5 - 4.6



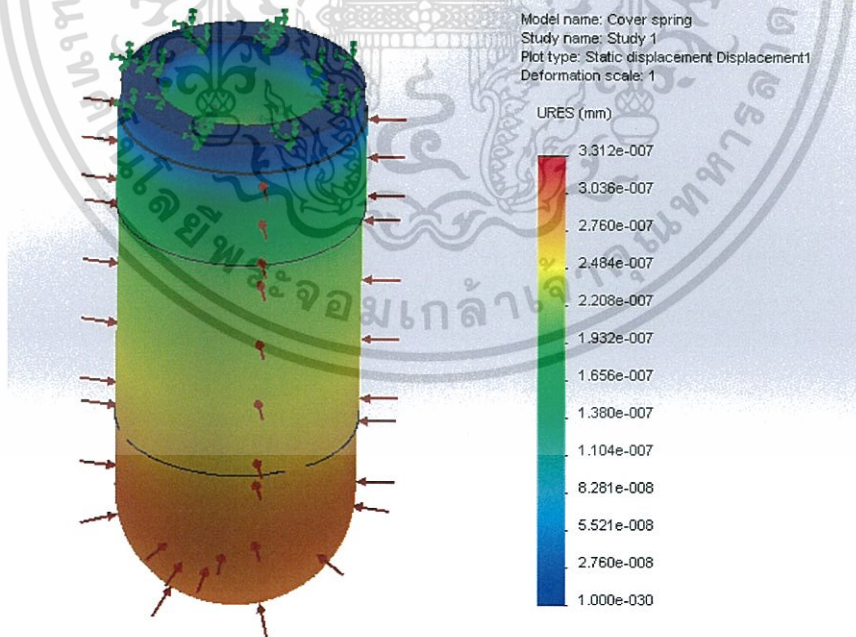
รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ความเค้นลูกสูบดีเซลเพอร์บมองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



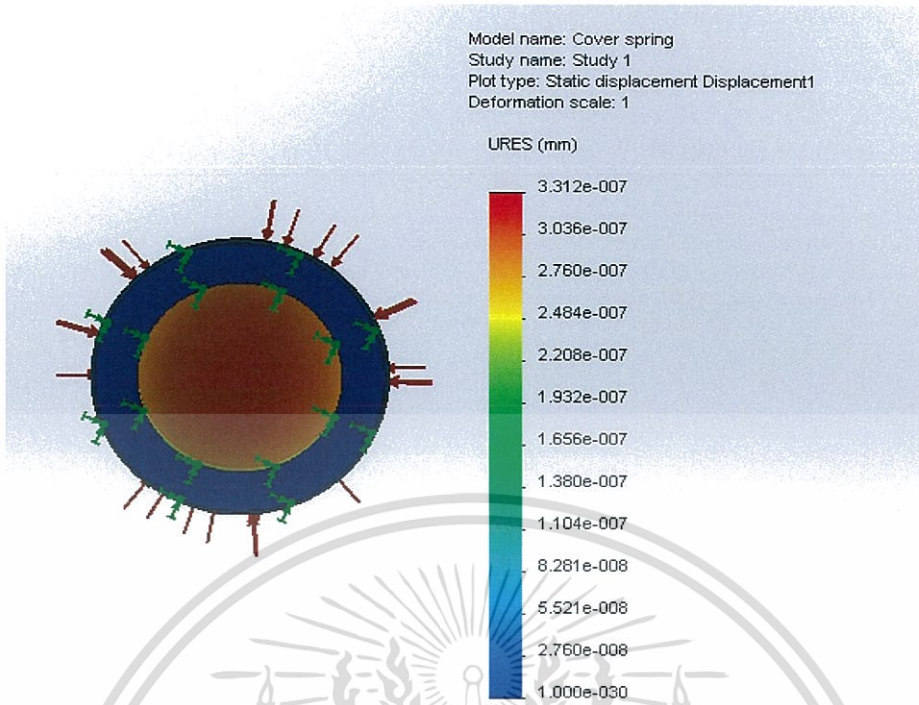
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ความเค้นลูกสูบดีเซลเพสเซอร์มองจากด้านบน

4.4 ผลจากการวิเคราะห์Displacement ที่เกิดขึ้นกับลูกสูบดีเซลเพสเซอร์เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7- 4.8



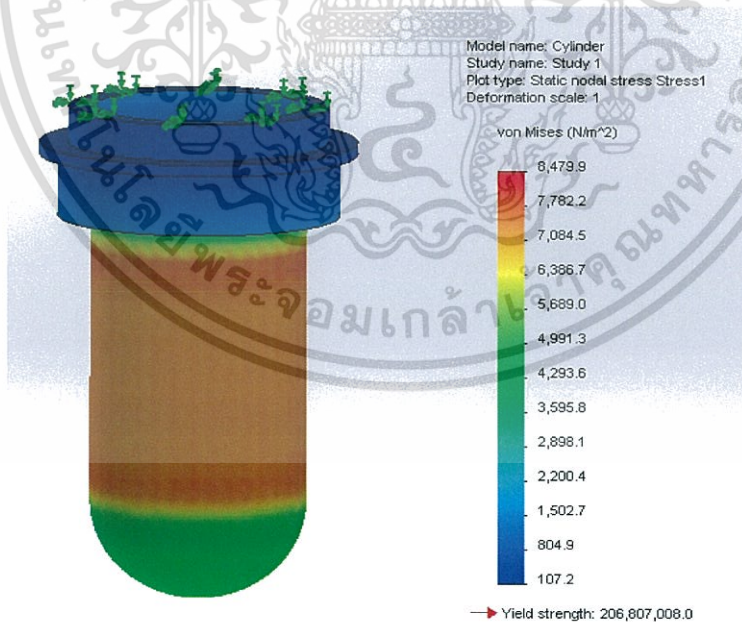
รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์Displacement ลูกสูบดีเซลเพสเซอร์มองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



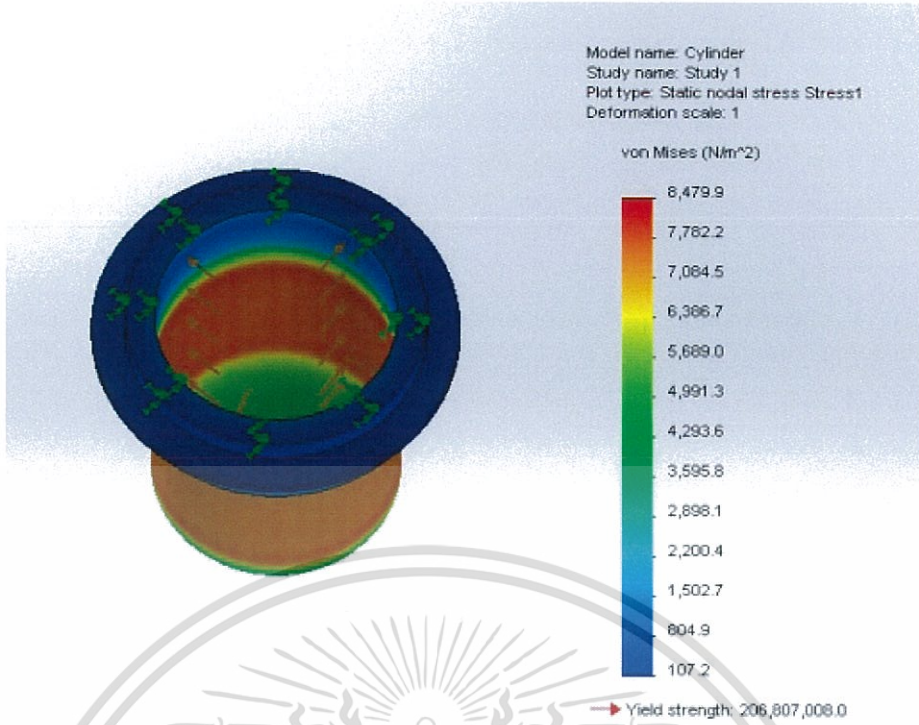
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ Displacement ลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านบน

4.5 ผลจากการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับเสื้อสูบดิสเพลเซอร์เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9- 4.10



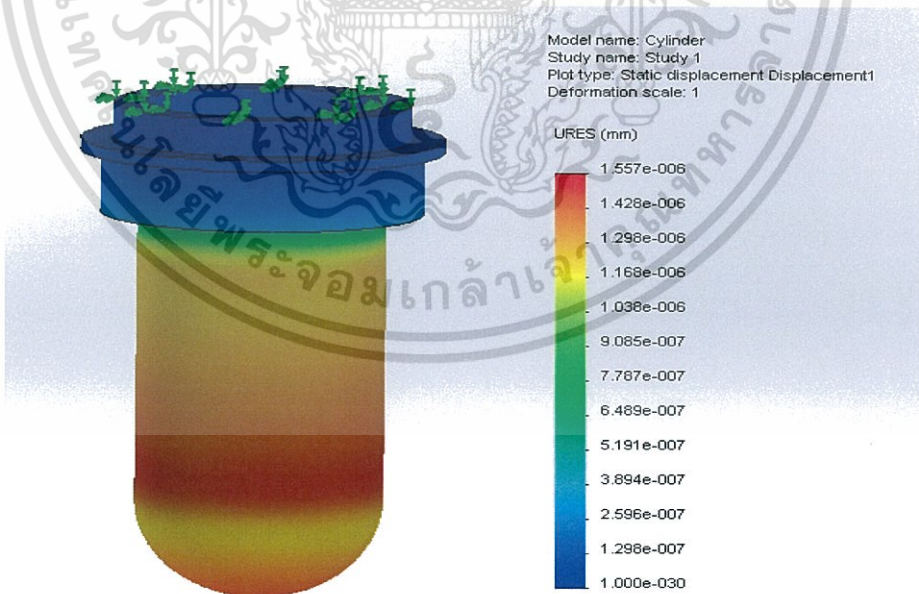
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ความเค้นเสื้อสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



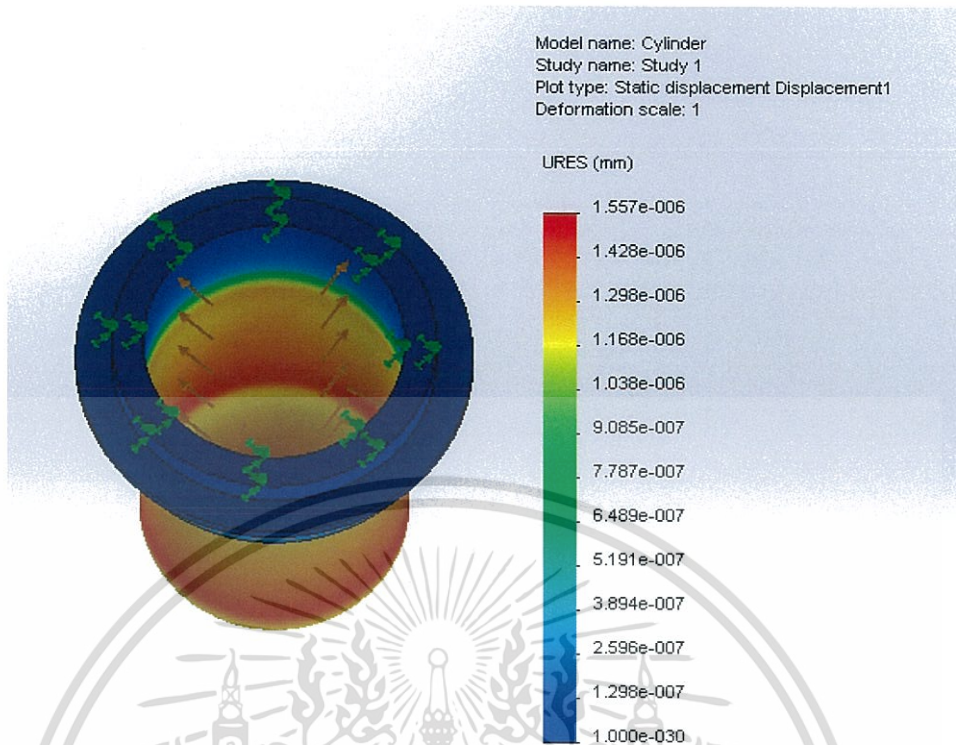
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ความเค้นเสื่อสับดิสเพลเซอร์มองจากด้านบน

4.6 ผลจากการวิเคราะห์ Displacement ที่เกิดขึ้นกับเสื่อสับดิสเพลเซอร์เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.12



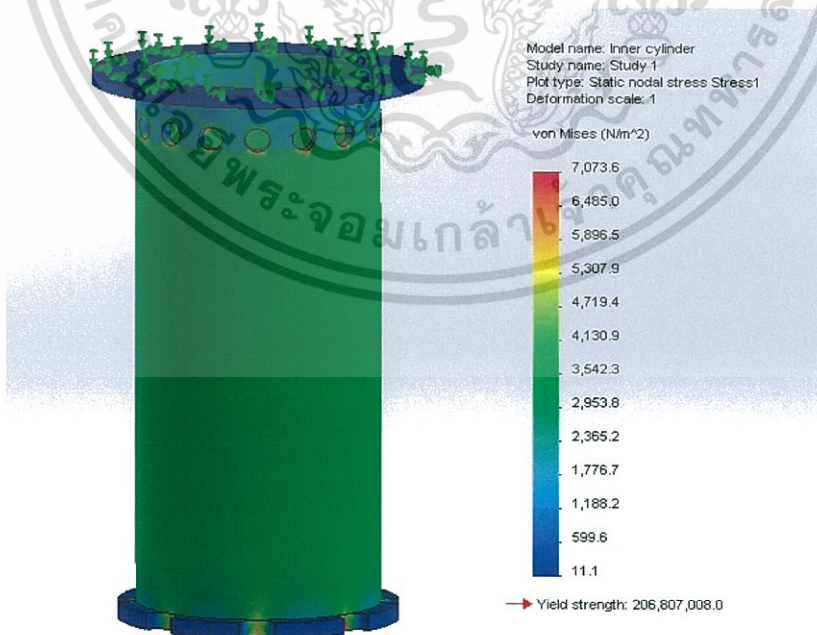
รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์ Displacement เสื่อสับดิสเพลเซอร์มองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



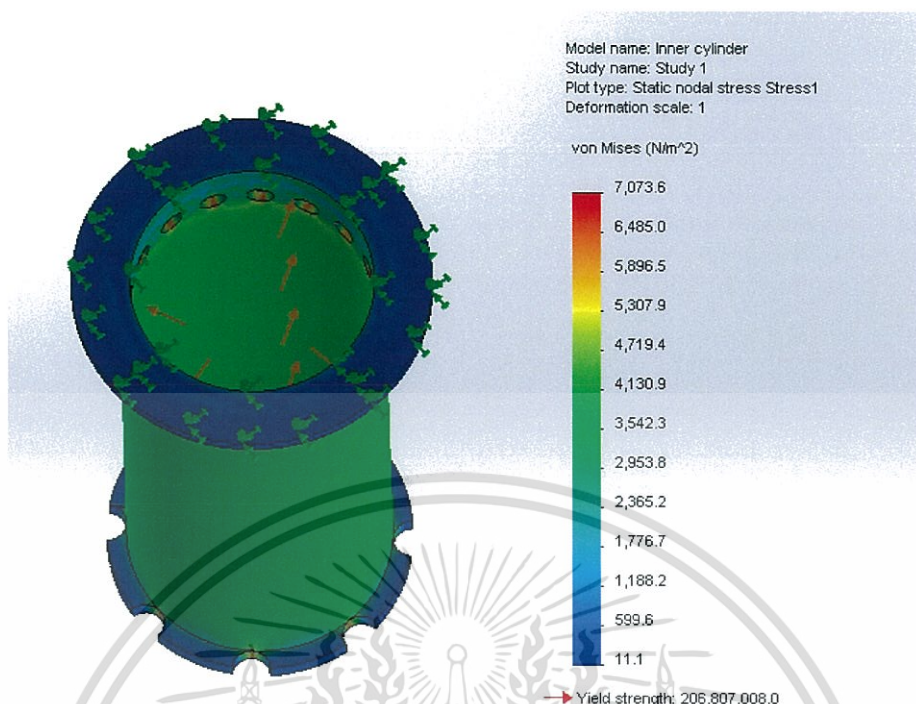
รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ Displacement เสื่อสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านบน

4.7 ผลจากการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับกระบอกลูกสูบดิสเพลเซอร์เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13- 4.14



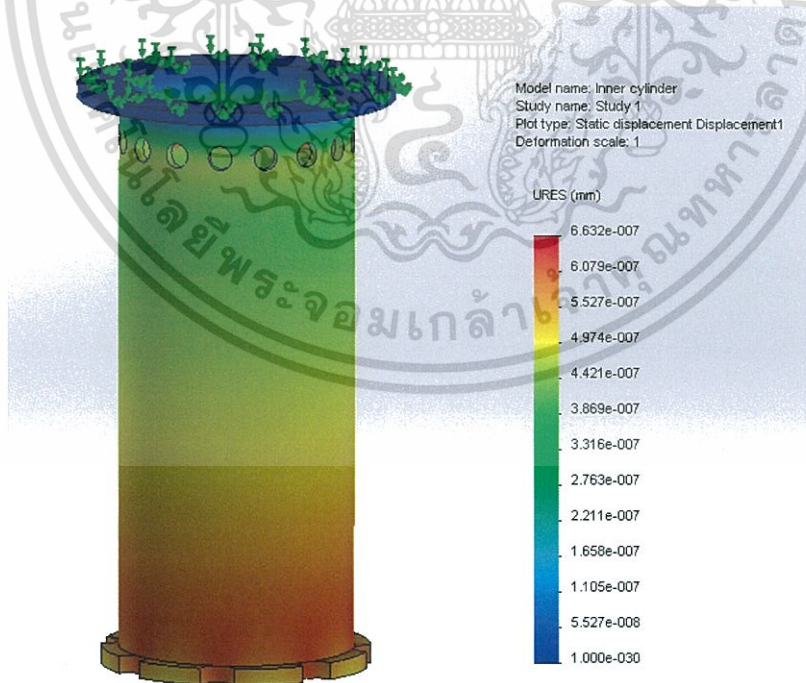
รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์ความเค้นกระบอกลูกสูบดิสเพลเซอร์มองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



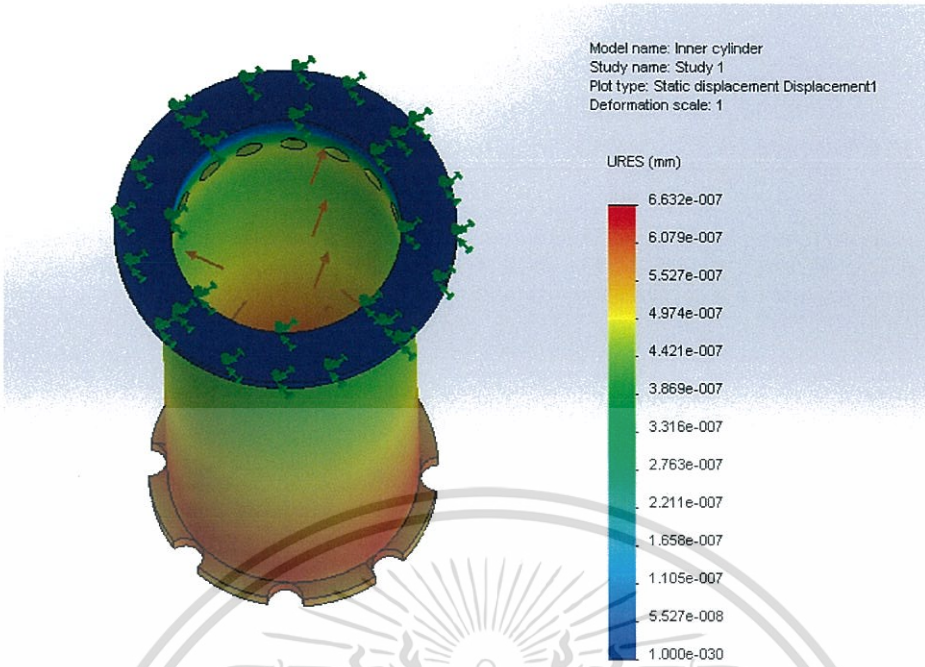
รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์ความเค้นกระบอกลูกสูบดีเซลเพเซอร์มองจากด้านบน

4.8 ผลจากการวิเคราะห์ Displacement ที่เกิดขึ้นกับกระบอกลูกสูบดีเซลเพเซอร์เมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 - 4.16



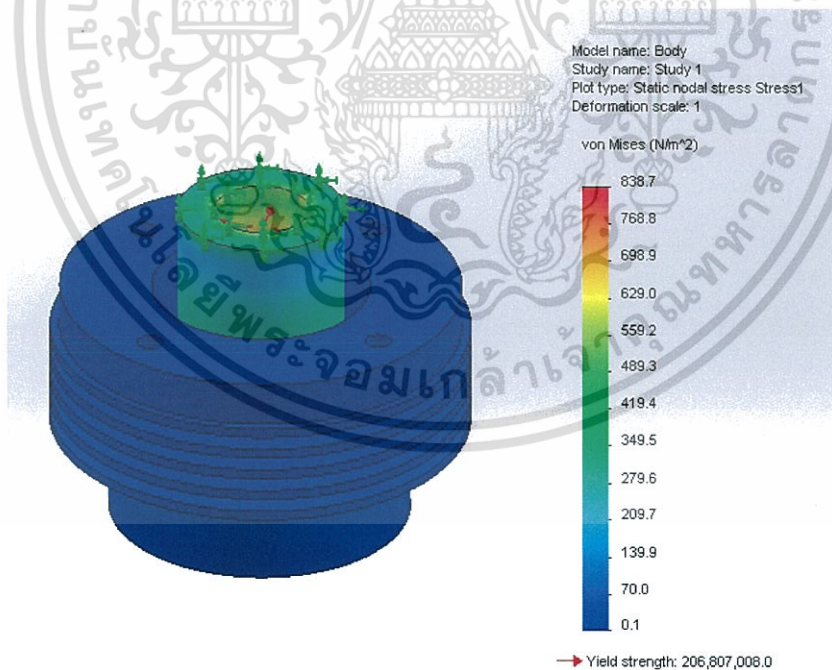
รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ Displacement กระบอกลูกสูบดีเซลเพเซอร์มองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



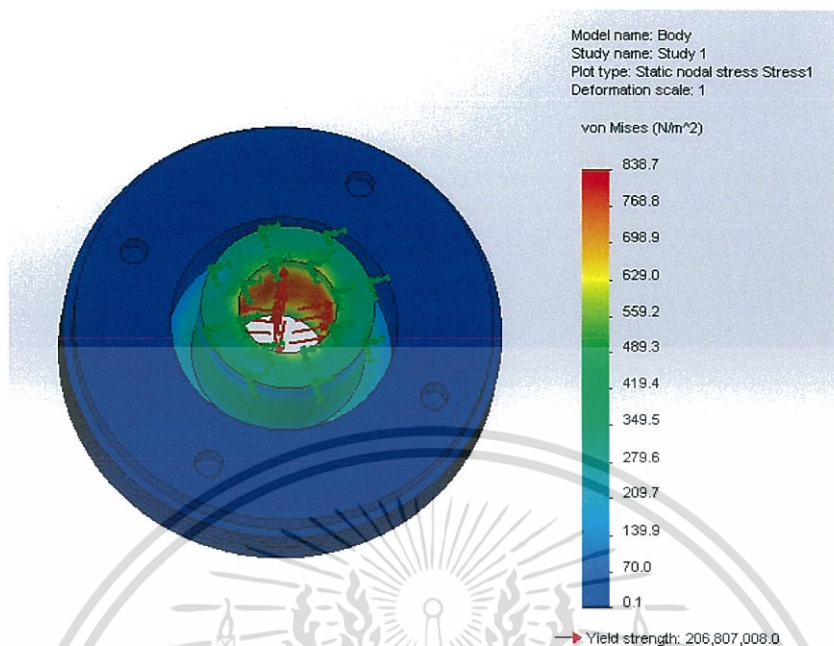
รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ Displacement ครอบลูกสูบดีเซลเพอร์มอโรนมองจากด้านบน

4.9 ผลจากการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับเสื้อสูบลูกสูบกำลังเมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.17- 4.18



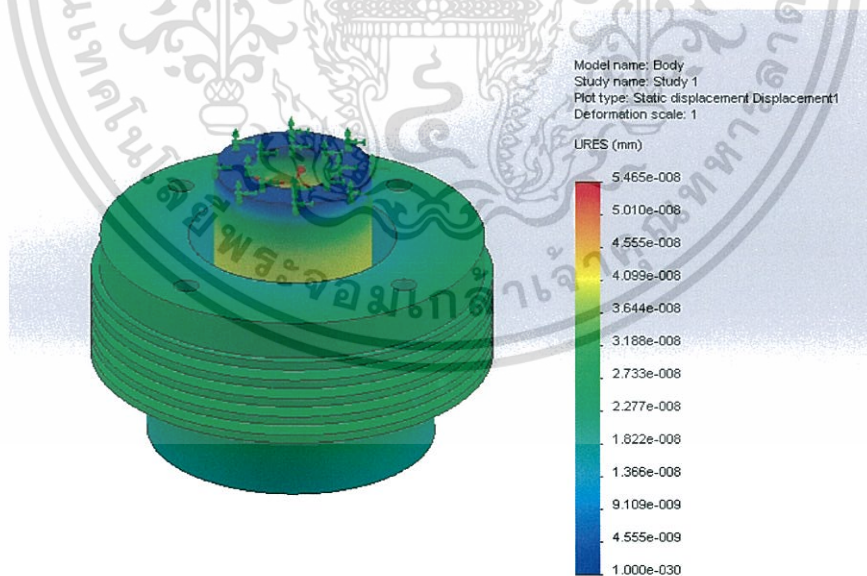
รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ความเค้นเสื้อสูบลูกสูบกำลังมองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



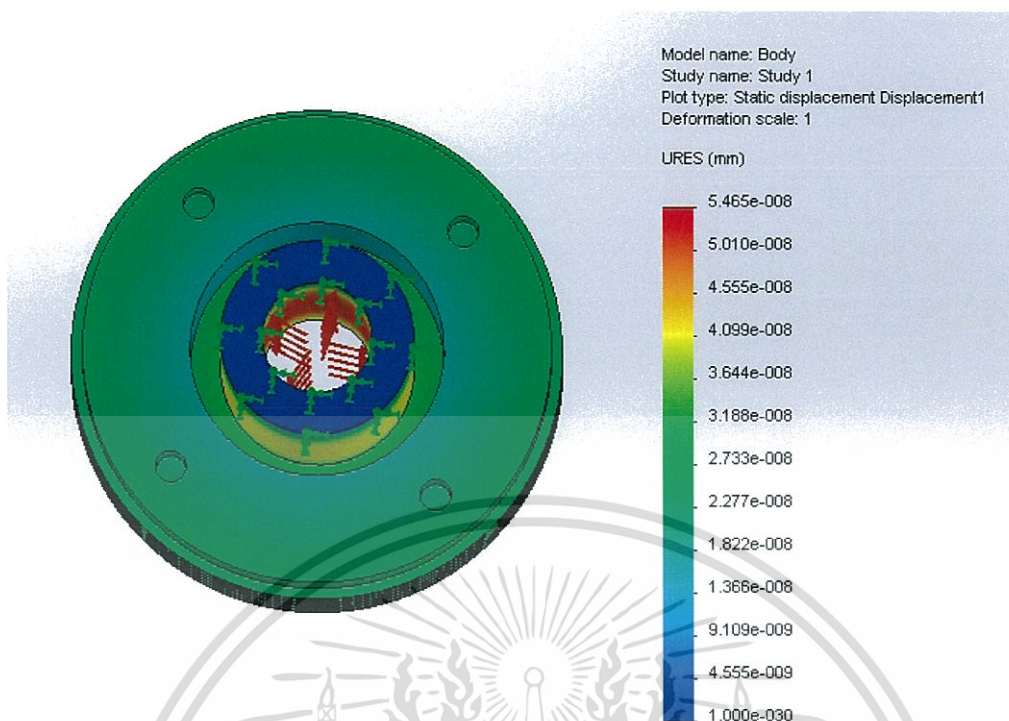
รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์ความเค้นเสียดของลูกสูบกำลังมองจากด้านบน

4.10 ผลจากวิเคราะห์ Displacement ที่เกิดขึ้นกับเสียดของลูกสูบเมื่ออัดความดันที่ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 - 4.20



รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์ Displacement เสียดของลูกสูบมองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



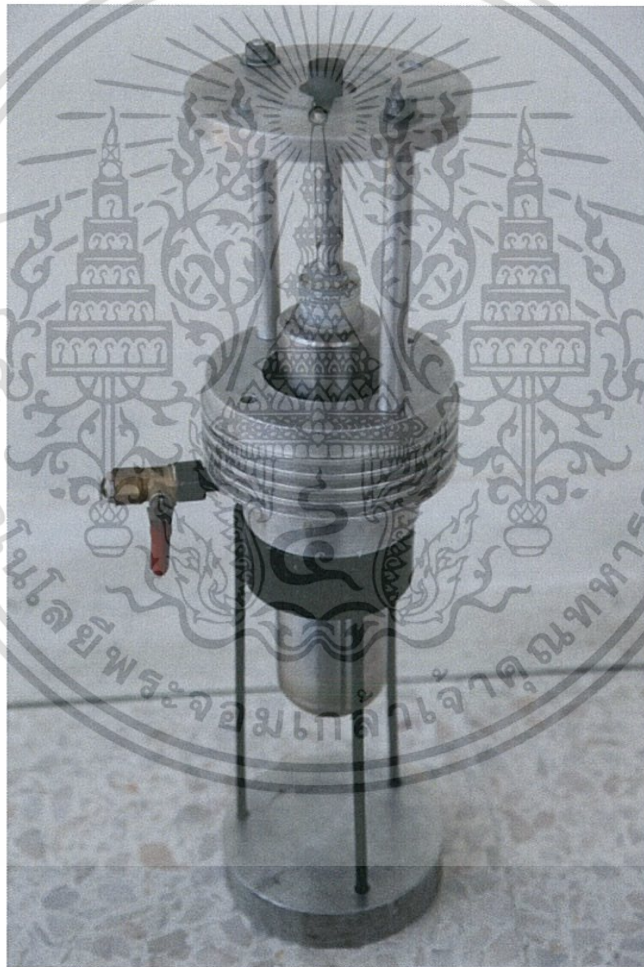
รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์ Displacement เสื่อสูบของลูกสูบลมจากด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในบทที่ 5 จะเป็นการอธิบายการสร้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์ต้นแบบ หลังจากที่ได้ทำการออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบแล้วก็มาขั้นการสร้างชิ้นงาน ซึ่งวัสดุต่างๆที่ใช้จะเป็นวัสดุที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไปในรูปที่ 5.1 แสดงเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระต้นแบบ



รูปที่ 5.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลตารางทางเทคนิคของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ

ประเภทของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	ลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ
เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกสูบดีสเพลเซอร์	4.4 mm
มวลของลูกสูบดีสเพลเซอร์	0.1195 kg
ระยะชักของลูกสูบดีสเพลเซอร์	2.1 mm
เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกสูบกำลัง	27 mm
มวลของลูกสูบกำลัง	0.117 kg
ระยะชักของลูกสูบกำลัง	4 mm
ปริมาตรกวาดเครื่องยนต์	23 cm ³
แหล่งความร้อน	ฮีเตอร์
ระบายความร้อน	อากาศ
สารทำงาน	อากาศ
ค่าความดันของก๊าซ	1 atm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 การศึกษาวัสดุที่นำมาใช้สร้างเครื่องยนต์ต้นแบบ

จากการศึกษาวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างเครื่องยนต์ต้นแบบมีวัสดุที่ใช้งานแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุแต่ละประเภทดังนั้นจะมีการอธิบายชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ดังต่อไปนี้

1. ครอบกอบุสดีสเพลสเซอร์ ทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อนเพื่อสร้างแรงดันในครอบกอบุสดีสเพลสเซอร์ ทำจากสแตนเลสแบบเพลากลม SK 304 ทนความร้อนได้ดี



รูปที่ 5.2 ครอบกอบุสดีสเพลสเซอร์

2. ลูกสูบดีสเพลสเซอร์ เป็นชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ในครอบกอบุสดีสเพลสเซอร์ในการสร้างชิ้นงานได้ถูกกำหนดให้มีน้ำหนักเบาจึงเลือกใช้อลูมิเนียมแบบเพลากลม เกรด 7075 ซึ่งมีน้ำหนักเบาและไม่เป็นสนิม



รูปที่ 5.3 ลูกสูบดีสเพลสเซอร์

3. หัวเผาและเสื้อสูบดีสเพลสเซอร์ ทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อนและบรรจุรีเจนเนอเรเตอร์อยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านข้างของเสื้อสูบดิสเพสเซอร์ ทำจากสแตนเลสแบบเพลากลม SK 304 ซึ่งสามารถทนความร้อนสูง



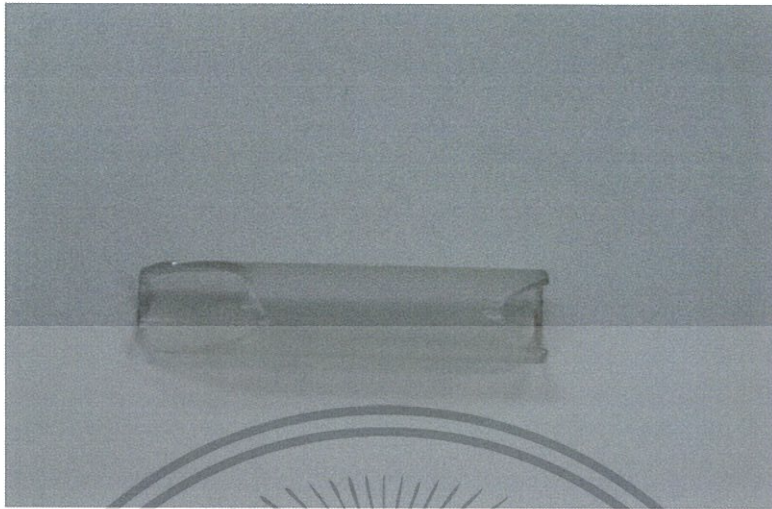
รูปที่ 5.4 หัวเผาและเสื้อสูบดิสเพสเซอร์ก็กเก็บความร้อนด้วยรีเจนเนอเรเตอร์

4. ครอบสูบของลูกสูบกำลัง ประกอบด้วยสองส่วนคือครอบสูบทำมาจากสแตนเลสแบบเพลากลม SK 304 ขัดเงาเพื่อลดความฝืดของครอบสูบและในส่วนของครีบบระบายความร้อนทำจากอลูมิเนียมแบบเพลากลม เกรด 7075 กลิ้งขึ้นรูป



รูปที่ 5.5 ครอบสูบของลูกสูบกำลัง

5. ก้านสูบดิสเพสเซอร์ ทำจากอลูมิเนียมมีหลอดแก้วเข็มฉีดยาสวมอยู่มีน้ำหนักเบาการใช้หลอดแก้วเข็มฉีดยาทำให้ลดความฝืดระหว่างลูกสูบดิสเพสเซอร์และก้านสูบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 ก้านสูบติสเพสเซอร์

6. ก้านลูกสูบกำลัง ทำจากซูเปอร์ลีน (Superlene Nylon) และอลูมิเนียมเพื่อให้น้ำหนักเบาเพราะเป็นชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ไปมา



รูปที่ 5.7 ก้านสูบกำลัง

7. ลูกสูบกำลัง ทำจากซูเปอร์ลีน (Superlene Nylon) ตีปิดด้วยทองเหลืองขัดเงาเพื่อลดความฝืดและมีน้ำหนักเบา
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 ลูกสูบกำลัง

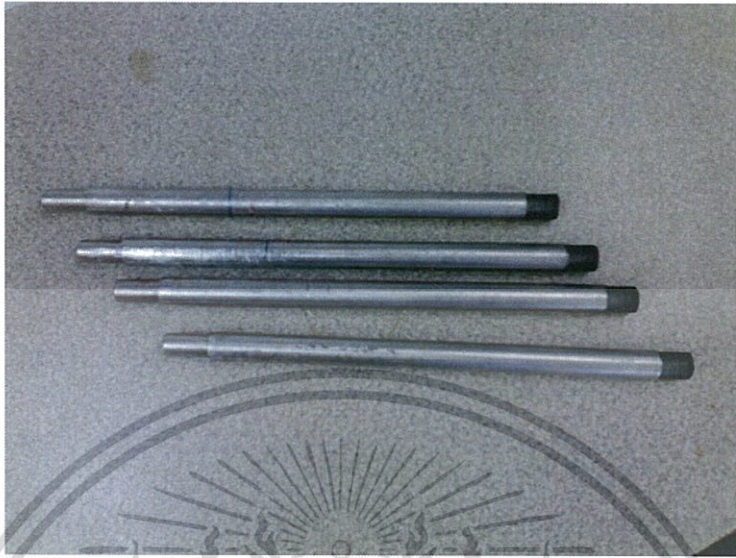
8. หน้าแปลนยึดเสา ทำจากอลูมิเนียมทำให้มีน้ำหนักเบา



รูปที่ 5.9 หน้าแปลนยึดเสา

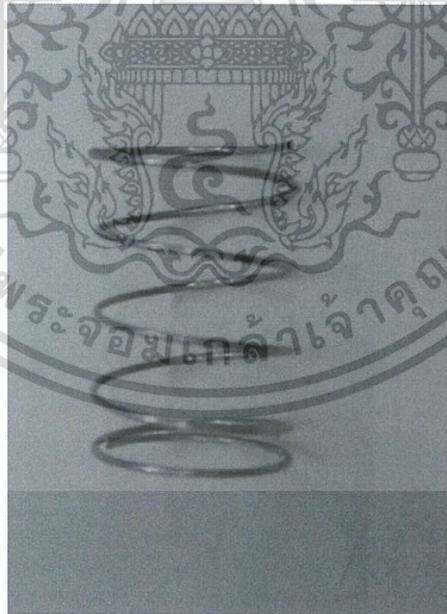
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เสายืดหน้าแปลน ทำจากอลูมิเนียมน้ำหนักเบาไม่เป็นสนิม



รูปที่ 5.10 เสายืดหน้าแปลน

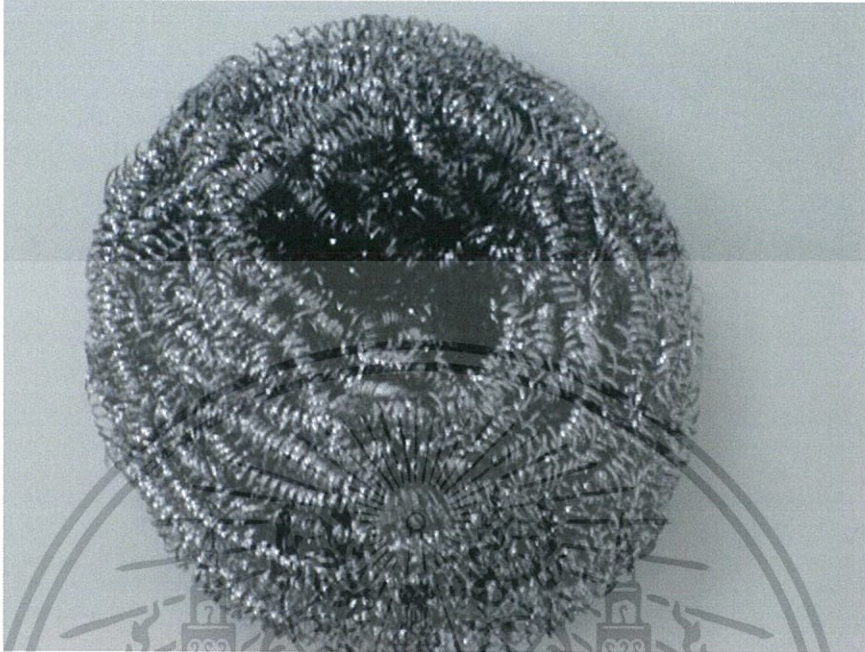
10. สปริง ทำจากสแตนเลสทำหน้าที่บังคับการเคลื่อนที่ของลูกสูบดีเซลเพสเซอร์



รูปที่ 5.11 สปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. รีเจนเนอร์เรเตอร์ ทำจากขดลวดสแตนเลสความพรุน 90% เป็นตัวเก็บความร้อน



รูปที่ 5.12 รีเจนเนอร์เรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 การทดสอบเครื่องยนต์ต้นแบบ

ในการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิตใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังนี้

6.1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

6.1.1 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (DIGICON DP-88) วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ - 20 + 500 องศาเซลเซียส (- 4 + 932 องศาฟาเรนไฮต์) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของกระบอกสูบดีเซลเพลเซอร์



รูปที่ 6.1 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

6.1.2 มัลติมิเตอร์ (Multimeter UT30C UNI-T) ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า (V) และวัดกระแสไฟฟ้า (A) ที่เครื่องยนต์สามารถผลิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 มัลติมิเตอร์ (Multimeter UT30C UNI-T)

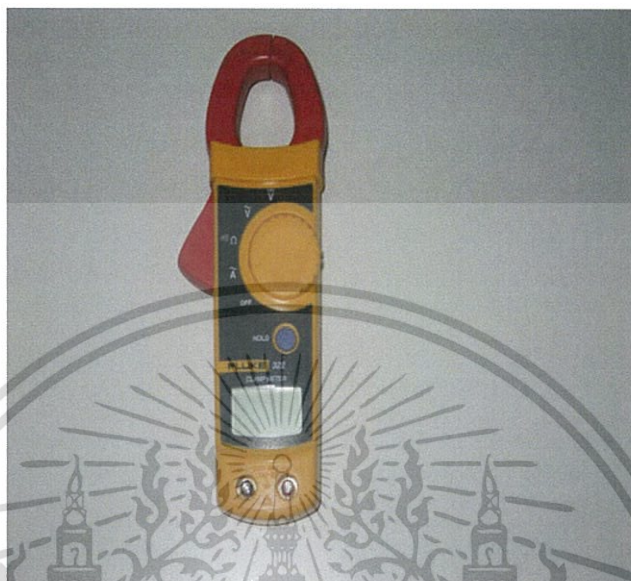
6.1.3 มัลติมิเตอร์ (Multimeter UN-860C Union) ใช้สำหรับวัดความถี่ไฟฟ้า (Hz) ที่จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)



รูปที่ 6.3 มัลติมิเตอร์ (Multimeter UN-860C Union)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.4 แคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter 322 Fluke, USA) ใช้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า (A) ที่จ่ายให้กับเครื่องยนต์



รูปที่ 6.4 แคลมป์มิเตอร์

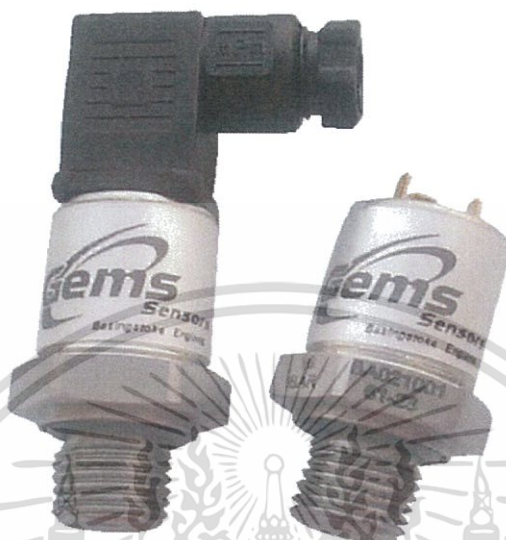
6.1.5 ฮีตเตอร์ (Heater) ขนาด 220 โวลต์ 500 วัตต์ ทำหน้าเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนให้แก่เครื่องยนต์



รูปที่ 6.5 ฮีตเตอร์ (Heater)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.6 เครื่องวัดความดัน (Pressure Transmitters) ใช้วัดความดันของสารทำงานในของ เครื่องยนต์ขณะทำการทดสอบเครื่องยนต์



รูปที่ 6.6 เครื่องวัดความดัน (Pressure Transmitters)

6.1.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ใช้ผลิตไฟฟ้าที่ได้จากการทำงานของเครื่องยนต์ เพื่อนำไป หาค่ากำลังทางไฟฟ้าของเครื่องยนต์



รูปที่ 6.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.8 ชุดโหนดไฟฟ้าเพื่อใช้หากำลังทางไฟฟ้าของเครื่องยนต์



รูปที่ 6.8 ชุดโหนดไฟฟ้า

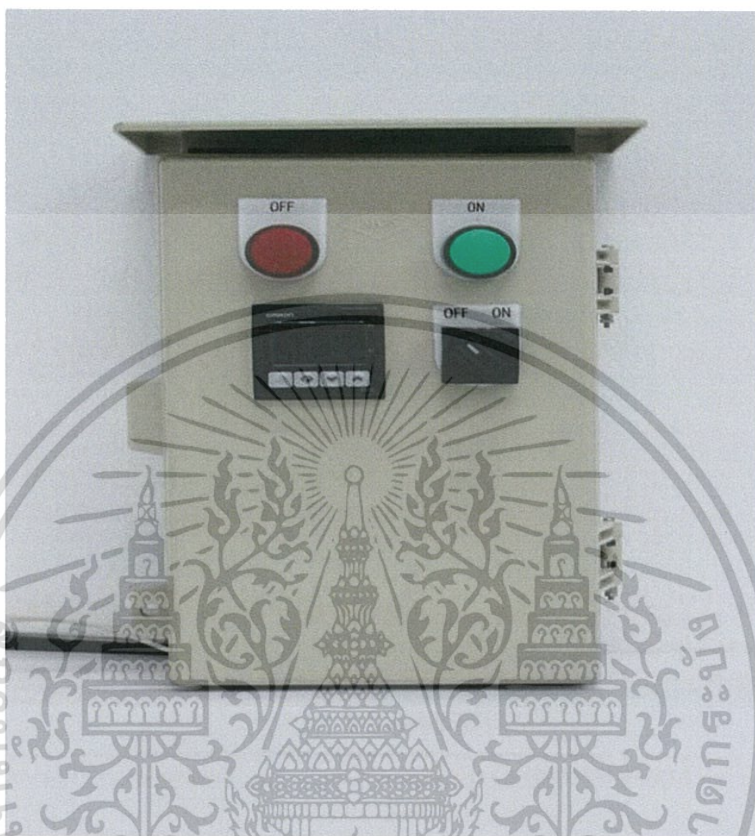
6.1.9 นาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 6.9 นาฬิกาจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.10 เครื่องควบคุมอุณหภูมิใช้สำหรับควบคุมความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์



รูปที่ 6.10 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

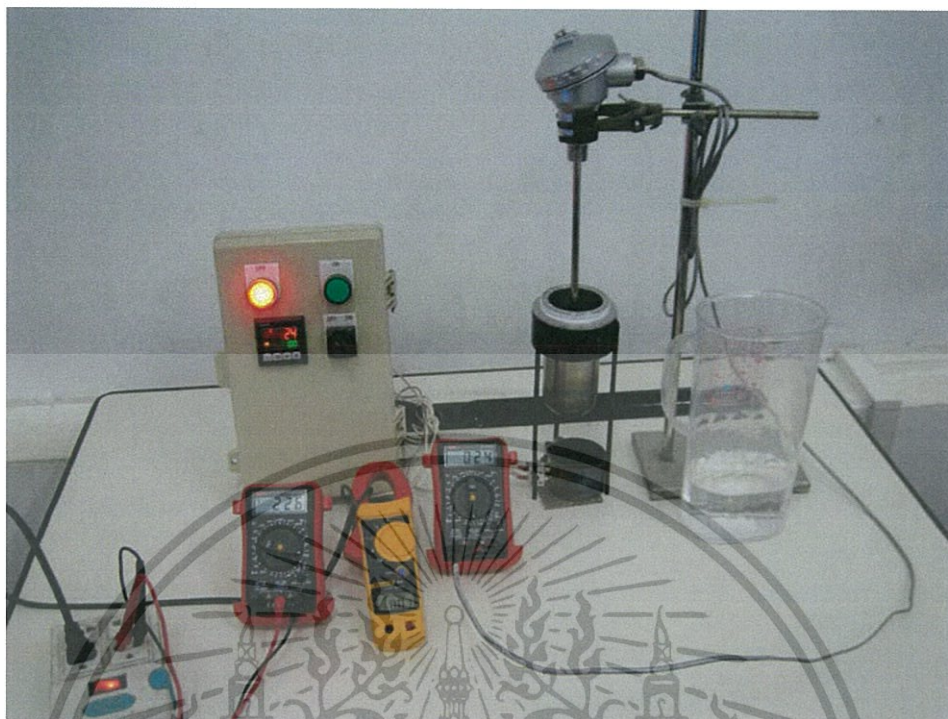
6.2 การทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิต

การทดสอบเครื่องยนต์แบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ คือ

6.2.1. การทดสอบหาความร้อนที่ป้อนให้แก่สารทำงาน

เนื่องจากค่าความร้อนที่ป้อนให้แก่เครื่องยนต์ไม่สามารถวัดได้ในขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน จึงต้องทดสอบก่อนที่จะทดสอบกำลัง เพื่อให้ได้ค่าความร้อนที่ป้อนให้แก่เครื่องยนต์จริงในระหว่างการทดสอบสมรรถนะ และนำไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์ ในรูปที่ 6.11 แสดงภาพถ่ายของการทดสอบหาความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ วิธีทำการทดสอบมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

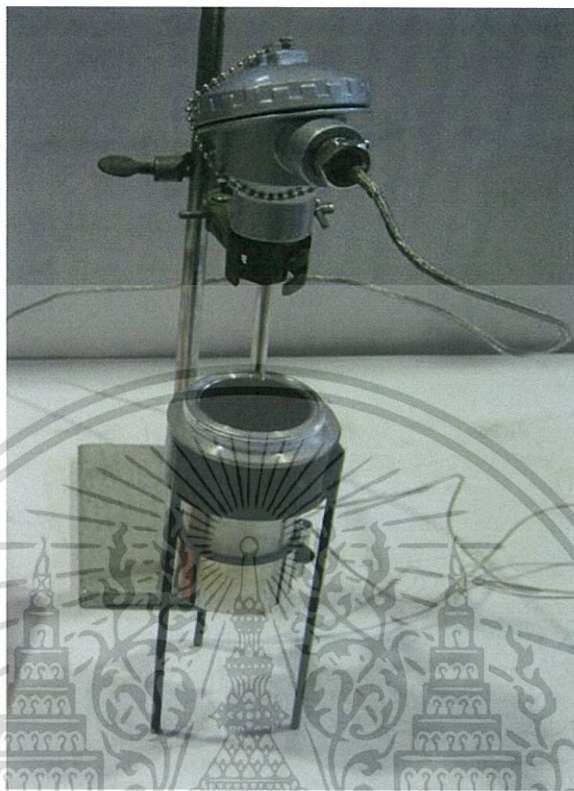
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.11 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาความร้อนที่ป้อนให้แก่สารทำงาน

1. ถอดกระบอกสุบติสเพสเซอร์ออกจากเครื่องยนต์
2. นำกระบอกสุบติสเพสเซอร์มาชั่งน้ำหนักรวมกับน้ำสะอาดที่บรรจุอยู่เต็มช่องร้อน แล้วหักน้ำหนักตัวเปล่าของกระบอกสุบติสเพสเซอร์ออก ก็จะทราบจำนวนน้ำที่ใช้ในการทดสอบ
3. นำกระบอกสุบติสเพสเซอร์มาวางบนโครงทดสอบ แล้วนำฮีเตอร์มารัดด้านล่างของกระบอกสุบติสเพสเซอร์เพื่อใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ (ดูรูปที่ 6.13)
4. นำเทอร์โมคัปเปิ้ลมาใส่ไว้ในกระบอกสุบติสเพสเซอร์ โดยให้ปลายของเทอร์โมคัปเปิ้ลอยู่ที่กึ่งกลางของความลึกของช่องร้อน (ดูรูปที่ 6.12)
5. สายเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับมัลติมิเตอร์เพื่อแสดงค่าอุณหภูมิของน้ำที่ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 ภาพถ่ายแสดงการทดสอบหาความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์



รูปที่ 6.13 ภาพถ่ายแสดงการติดตั้งฮีเตอร์เข้ากับกระบอกสุบติสเพเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เตรียมน้ำสะอาดตามน้ำหนักที่ได้ในข้อ 2
 7. นำแคลมป์มิเตอร์แบบดิจิตอลวัดกระแสไฟฟ้า (A) หนีบที่สายไฟเข้าฮีเตอร์ และใช้มัลติมิเตอร์แรงดันไฟฟ้า (V)
 8. เปิดสวิตช์ไฟที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับฮีเตอร์
 9. อุณหภูมิของกระบอกสุบดิสเพลเซอร์ให้ได้ 50 องศาเซลเซียส แล้วจึงใส่น้ำที่เตรียมไว้จากข้อ 6 ลงไปในกระบอกสุบดิสเพลเซอร์
 10. อ่านค่ากระแสไฟฟ้า (A) จากแคลมป์มิเตอร์แบบดิจิตอล และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (V) จากมัลติมิเตอร์เริ่มต้นการจับเวลา จดบันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ
 11. จดบันทึกอุณหภูมิของน้ำทุก 10 วินาที จนกระทั่งน้ำมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 100°C จึงหยุดการทดสอบ
 12. จดบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า (A) จากแคลมป์มิเตอร์แบบดิจิตอล และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (V) จากมัลติมิเตอร์สุดท้าย หยุดการจับเวลาและจดบันทึกเวลาที่ใช้ในการทดสอบ
 13. นำเทอร์โมคัปเปิ้ลออกจากกระบอกสุบดิสเพลเซอร์เทน้ำออกจากกระบอกดิเพลเซอร์รอให้กระบอกสุบดิสเพลเซอร์เย็นแล้วจึงทดสอบครั้งต่อไป
- ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหาความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์นี้อยู่ในตารางที่ ข-1 ถึง ข-4 (ดูภาคผนวก ข)

6.2.2 การทดสอบกำลังทางไฟฟ้าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสามิต

การทดสอบหาความร้อนป้อนให้แก่เครื่องยนต์ได้ค่าการป้อนพลังงานความร้อนที่ 441.05 J/s หลังจากทราบค่าของความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์แล้ว จึงทดสอบหา กำลังทางไฟฟ้าของเครื่องยนต์ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1. จัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังนี้ ฮีเตอร์, มัลติมิเตอร์, เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด, แคลมป์มิเตอร์แบบดิจิตอล, เซ็นต์เซอร์วัดความดัน, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator), ชุดโหลดไฟฟ้า, นาฬิกาจับเวลาแล้วนำติดตั้งเข้ากับเครื่องยนต์ดังแสดงในรูปที่ 6.14
2. นำฮีเตอร์มารัดด้านล่างของกระบอกสุบดิสเพลเซอร์เพื่อใช้ในการทดสอบหา กำลังของเครื่องยนต์
3. จดบันทึกค่าของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นแล้วเริ่มจับเวลา จากนั้นจึงจดบันทึกค่าของอุณหภูมิทั้งหมดทุก 30 วินาที จนกระทั่งอุณหภูมิของสารทำงานในช่องร้อนสูงประมาณ 140°C แสดงในรูปที่ 6.15
4. เมื่อให้ความร้อนกับสารทำงาน 2 นาที อุณหภูมิ 140°C แล้วจึงสตาร์ทเครื่องยนต์ โดยยังคงจดบันทึกค่าของอุณหภูมิต่อเนื่องและเพิ่มการจดบันทึกค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) กระแสไฟฟ้า (A) และความถี่ของเครื่องยนต์จากโดยมัลติมิเตอร์ทุก 30 วินาที พร้อมกันด้วย
5. หลังจากจดบันทึกผลการทดสอบ 5 นาทีแล้วอ่านค่ากระแสไฟฟ้า (A) จากแคลมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิเตอร์แบบดิจิตอล และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (V) จากมัลติมิเตอร์สุดท้ายจดบันทึก หยุดการจับเวลา จดบันทึกอุณหภูมิสุดท้ายที่ด้านร้อนและด้านเย็น แล้วปิดตู้ควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นรอให้เครื่องยนต์เข้าสู่สภาวะปกแล้วทำการทดสอบซ้ำอีก 2 ครั้ง

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของเครื่องยนต์นี้อยู่ในตารางที่ ข-5 (ดูภาคผนวก ข)



รูปที่ 6.14 การวัดอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น



รูปที่ 6.15 ภาพถ่ายแสดงการทดสอบกำลังทางไฟฟ้าของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบหาการทดสอบหาความร้อนที่ป้อนให้แก่สารทำงานและการทดสอบกำลังทางไฟฟ้า เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิต

7.1 ผลลัพธ์จากการทดสอบหาความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์

ข้อมูลจากการทดสอบหาความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์ในขั้นแรกจะนำมาเขียนเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ดูดซับความร้อนจากฮีตเตอร์กับเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิ การทดสอบนี้ทำ 4 ครั้งได้กราฟดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.1- 7.5

สิ่งที่ต้องการจากกราฟนี้คืออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ซึ่งแสดงด้วยความชันของเส้นกราฟนั่นเอง นำอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไปคำนวณหาความร้อนที่น้ำดูดซับไว้ได้จากสมการ

$$q_{in} = m_w c_{p,w} \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (7.1)$$

เมื่อ m_w = มวลของน้ำที่ใช้ในการดูดซับความร้อน (0.260 kg)

$c_{p,w}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4187 J/kg K)

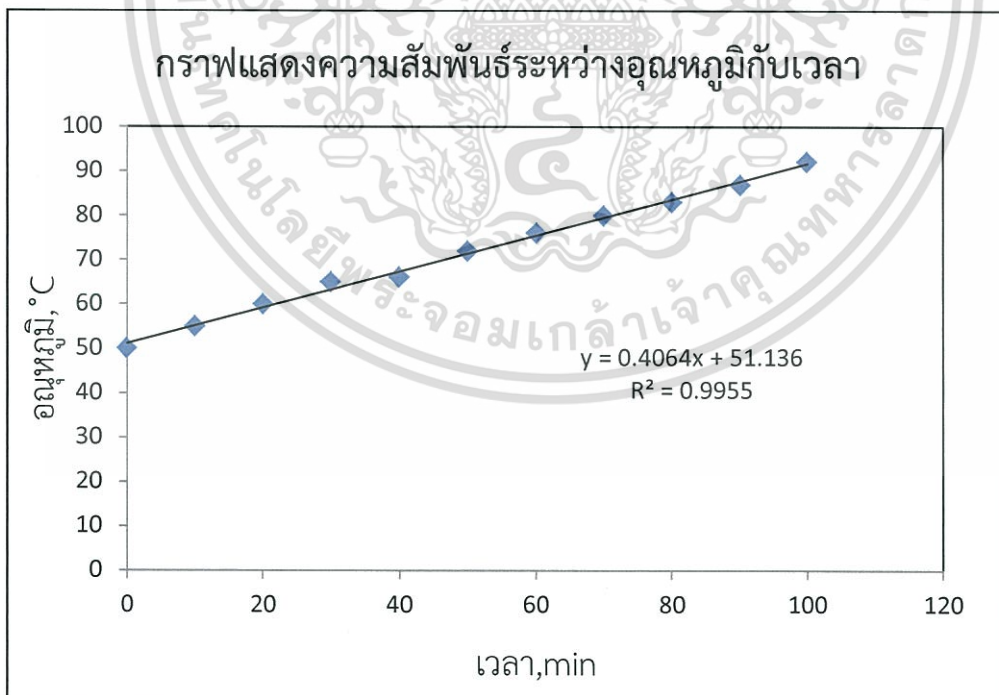
$\frac{\Delta T}{\Delta t}$ = อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C/s}$)

จากตารางที่ ข-1 ถึง ข-4 (ภาคผนวก ข) ข้อมูลและผลลัพธ์จากการทดสอบหาค่าของความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ถูกนำมาสรุปไว้ในตารางที่ 7.1 ดังนี้

ตารางที่ 7.1 ผลลัพธ์จากการทดสอบหาความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์

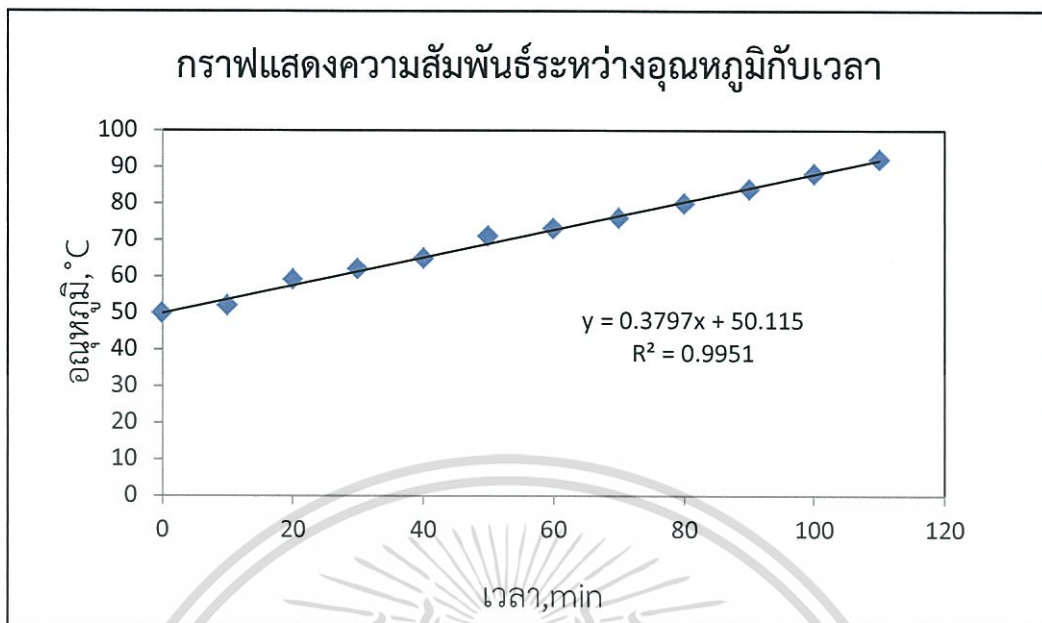
m_f (w/s)	($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	q_f (J/s)	q_{in} (J/s)
506	0.406	506	441.874
479.6	0.404	479.6	439.697
475.2	0.401	475.2	436.432
473	0.410	473	446.227

ผลลัพธ์จากการทดสอบหาค่าของความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ทั้ง 4 ครั้งถูกนำมาแสดงเป็นกราฟตามรูปที่ 7.1 และรูปที่ 7.4

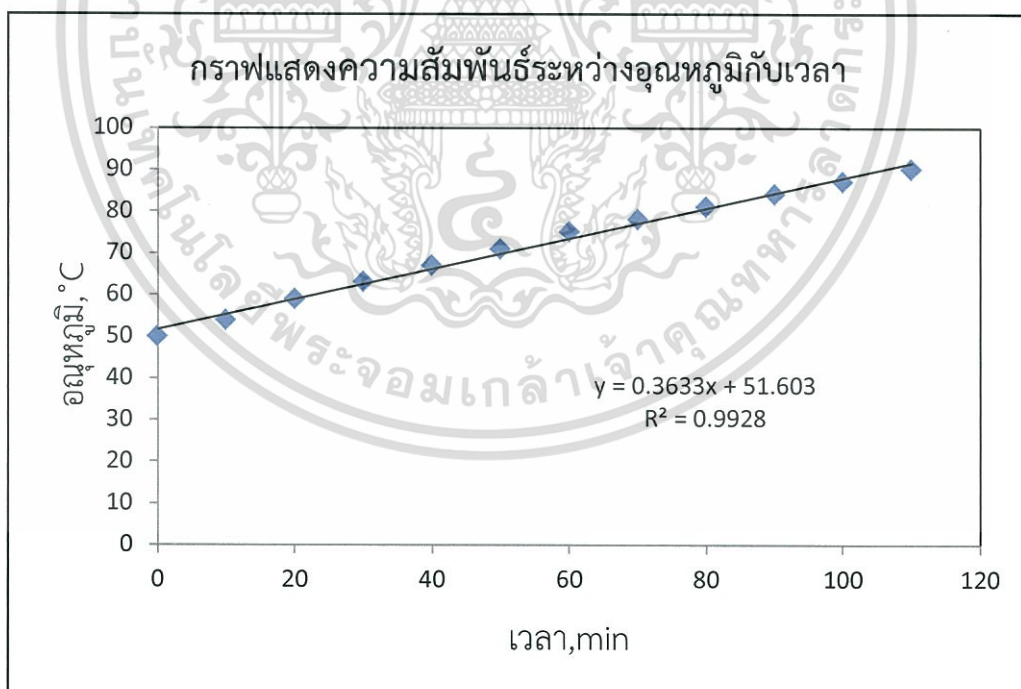


รูปที่ 7.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

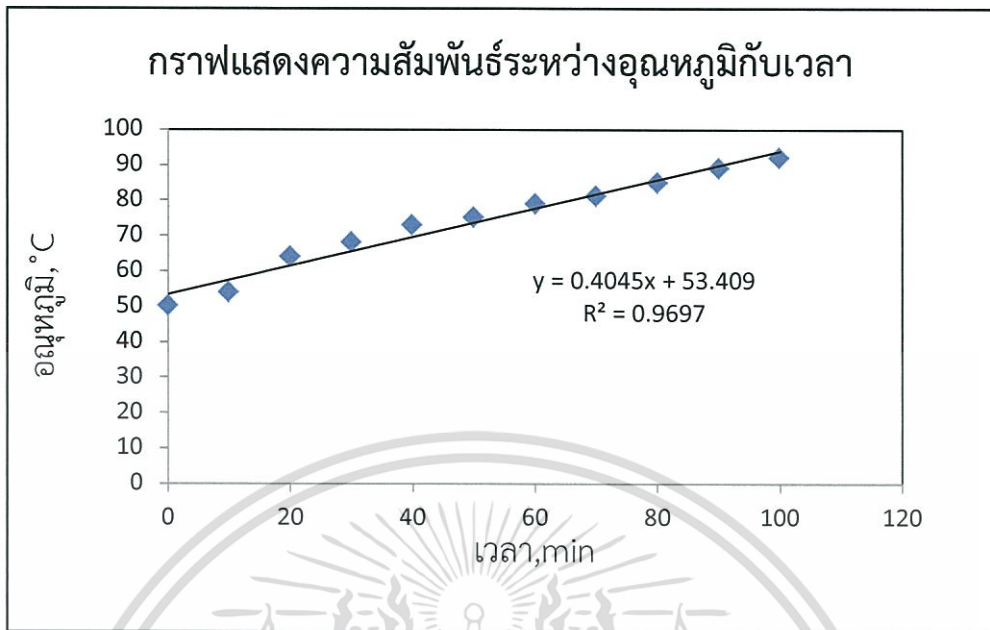


รูปที่ 7.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาครั้งที่ 2



รูปที่ 7.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

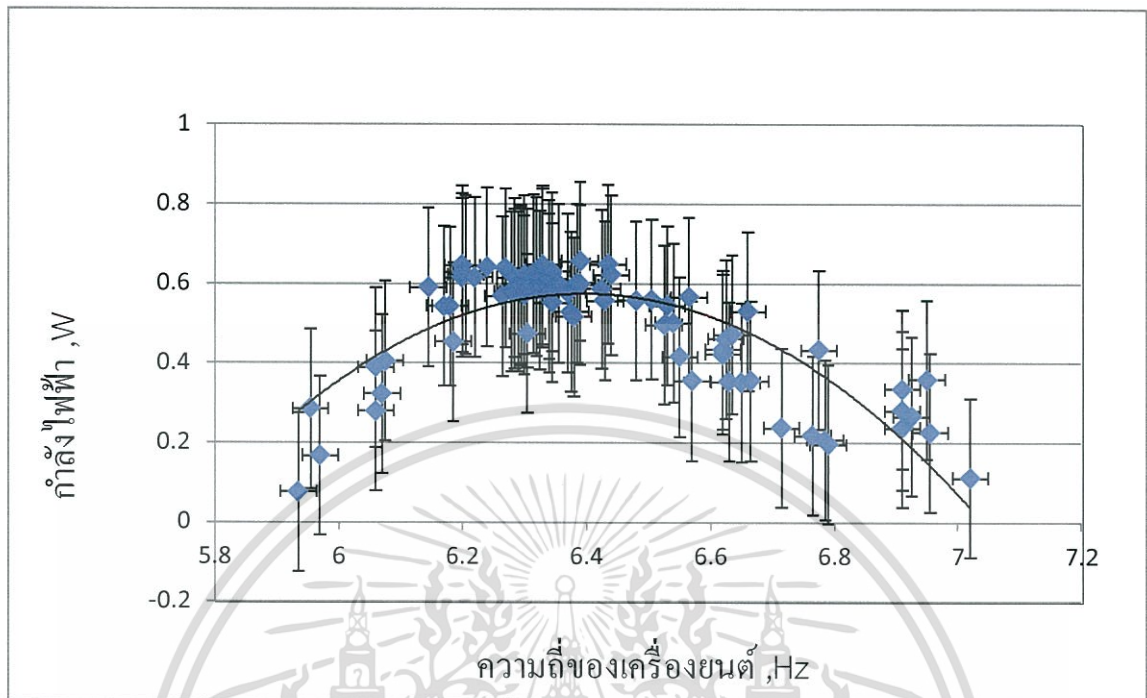


รูปที่ 7.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาครั้งที่ 4

7.2 ผลการทดสอบทางไฟฟ้าของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิต

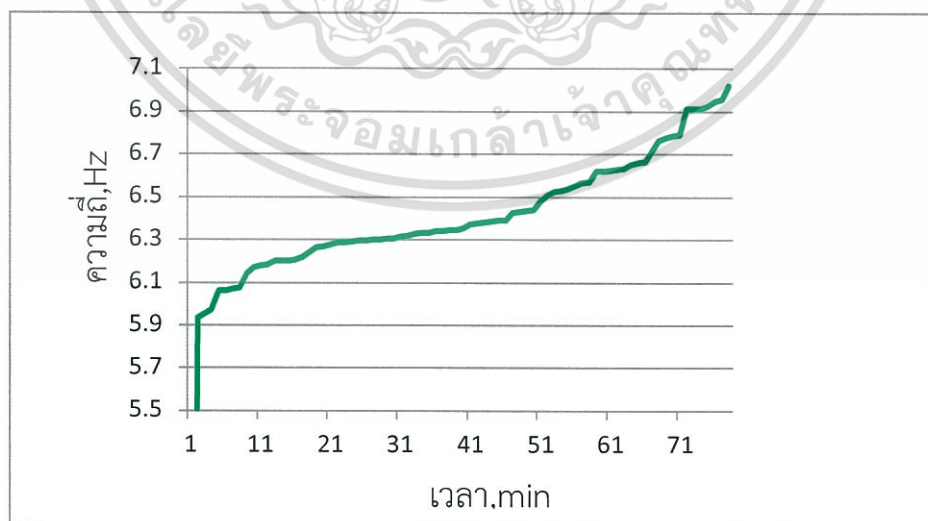
ผลการทดสอบทางไฟฟ้าของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิต แสดงในตารางที่ ข-5 (ภาคผนวก ข) จากข้อมูลสามารถนำไปอยู่ในรูปของกราฟข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 7.5 – 7.7

ในรูปที่ 7.5 แสดงกราฟกำลังไฟฟ้าของเครื่องยนต์ที่สัมพันธ์กับความถี่ของเครื่องยนต์จากกราฟจะเห็นว่าค่าความถี่ของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นไม่สามารถทำให้กำลังของเครื่องยนต์สูงขึ้นตามความถี่กลับทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง



รูปที่ 7.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องยนต์

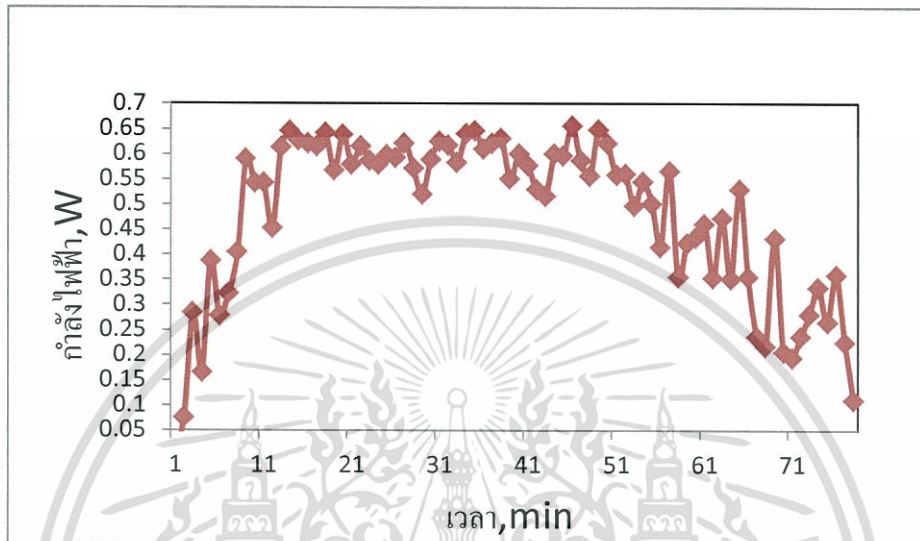
ในรูปที่ 7.6 แสดงกราฟความถี่(Hz)ของเครื่องยนต์จากเส้นกราฟในช่วงแรกความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะไม่ค่อนข้างจะคงที่ และเมื่อเวลาผ่านไปความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะเริ่มคงที่



รูปที่ 7.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของเครื่องยนต์กับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 7.7 แสดงกราฟกำลังไฟฟ้าที่เครื่องยนต์สามารถผลิตได้เมื่อเทียบกับเวลาจากเส้นกราฟในช่วงแรก กำลังไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อเวลาผ่านไปกำลังไฟฟ้าจะเริ่มคงที่และเมื่อกำลังไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเครื่องยนต์มีความถี่มากเกินไปเกิดจากความร้อนที่สะสมเกินขนาด



รูปที่ 7.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปโครงการและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปโครงการ

จากการศึกษาออกแบบและทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ ได้ผลสรุปจากการศึกษาและการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ต้นดังนี้

8.1.1 ผลจากทดสอบหาประสิทธิภาพการป้อนความร้อนของฮีตเตอร์ข้อมูลจากการทดสอบหาประสิทธิภาพการป้อนความร้อนของฮีตเตอร์ที่ให้กับเครื่องยนต์ได้ทำการทดสอบ 4 ครั้งโดยค่าการป้อนพลังงานความร้อนของฮีตเตอร์ให้กับเครื่องยนต์ที่ 441.05 J/s

8.1.2 ผลลัพธ์จากการทดสอบทางไฟฟ้าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิตสรุปจากการทดสอบทางไฟฟ้าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิต โดยใช้ฮีตเตอร์เป็นแหล่งป้อนความร้อนให้กับเครื่องยนต์ ระบายความร้อนด้วยอากาศและใช้ความดันที่บรรยากาศ ผลจากการทดสอบเครื่องยนต์ต้นแบบสามารถผลิตกำลังออกมาได้ 0.6 วัตต์ ที่ความถี่ 6.42 Hz มีการป้อนความร้อนให้กับเครื่องยนต์ที่ 441.05 วัตต์

8.2 ข้อเสนอแนะ

การที่เราได้ทดสอบทางไฟฟ้าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระขนาดสาธิตทำให้เราได้ทราบถึงกำลังของเครื่องยนต์ต้นแบบที่ไม่สูงมากและปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้กำลังของเครื่องยนต์ต้นแบบลดลงเราจึงมีข้อเสนอแนะที่สำคัญสำหรับผู้สนใจจะสร้างเครื่องยนต์ในครั้งต่อไปดังนี้

1. การป้อนความร้อนให้แก่เครื่องยนต์ควรควบคุมให้เหมาะสมไม่มากหรือน้อยจนเกินไป
2. การระบายความร้อนให้แก่เครื่องยนต์ควรใช้น้ำแทนอากาศ
3. การศึกษาการเพิ่มความดันให้แก่เครื่องยนต์ใช้ในการทดสอบ
4. การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมในการทำชิ้นเครื่องยนต์เพื่อลดปัญหาการแตกหักของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ แสดงตัวอย่างการแตกหักของชิ้นในรูปที่ 8.1 และรูปที่ 8.2

ในรูปที่ 8.1 แสดงแบริ่งก้านสูบของดิสเพลเซอร์ที่ทำมาจากแก้วเพื่อลดแรงเสียดทานแต่ข้อเสียคือแก้วไม่สามารถไม่ทนแรงกระแทกได้ทำให้เกิดการแตกหักเราควรศึกษาวัสดุชนิดอื่นมาใช้แทนแก้ว



รูปที่ 8.1 แบริ่งก้านสูบของดิสเพลเซอร์

ในรูปที่ 8.2 แสดงก้านสูบของดิสเพลเซอร์ที่ทำมาจากแก้วเพื่อลดแรงเสียดทานแต่ข้อเสียคือแก้วไม่สามารถไม่ทนแรงกระแทกได้ทำให้เกิดการแตกหักเราควรศึกษาวัสดุชนิดอื่นมาใช้แทนแก้ว



รูปที่ 8.2 ก้านสูบของดิสเพลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Walker G. Stirling engines. Oxford: Clarendon Press, 1980.
- [2] Sunpower, Inc. 2011, “About Overview” [Online].Available:
<http://www.sunpowerinc.com/about/index.php>
- [3] Sunpower, Inc. 2011, “Technology Engines” [Online].Available:
<http://www.sunpowerinc.com/services/technology/engines.php>
- [4] William Beale, Gong Chen. “Small Stirling Free-Piston Engines for Cogeneration” Sunpower,Inc. Athens,Ohio June, 1992
- [5] Neill W.Lane, William T.Beale. “ A 5 KW Electric FREE-Piston Stirling Engine.” Sunpower Inc, 6 Byard Street,Athens,Ohio,45701,USA
- [6] Neill W.Lane, William T.Beale. “Micro-Biomass Electric Power Generation” Sunpower,Inc. 182 Mill Street, Athens,Ohio,45701,USA
- [7] L.Bowman, N. W. Lane. “Micro-Scale Biomass Power” Sunpower,Inc.,P.O.Box 2625, Athens,OH,USA,45701
- [8] Jams Huth, Josh Collins. “Diesel Fuel-to-Electric Energy Conversion Using Compact,Portable, Stirling Engine-Based Systems” Sunpower, Inc., Athens, OH 45701, USA, huth@sunpower.com, collins@sunpower.com
- [9] J. Gary Wood, Neill Lane. “Development of Sunpower 35 We Free- Piston Stirling Converter” Sunpower, Inc. 182 Mill Street Athens Ohio 45701 740-594-2221 ext. 509, wood@sunpower.com
- [10] Advanced Stirling Converter (ASC). 2011. [Online].Available :
http://www.grc.nasa.gov/WWW/TECB/rps_asc.htm
- [11] National Aeronautics and Space Administration.2007. “Advanced Stirling Radioisotope Generator for NASA Space Science and Exploration Missions” [Online].Available:
http://www.grc.nasa.gov/WWW/TECB/RPS_ASRG_%20Handout.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Sunpower Inc. 2010. “CryoTel™ MT Family Free-Piston Stirling Cryocoolers Operating Instructions version 4” [Online].Available:
<http://www.sunpowerinc.com/library/pdf/CryoTel%20MT%20user%20manual%20version%204%20032510.pdf>
- [13] Sunpower Inc. 2010. “CryoTel-CT™ Family Free-Piston Stirling Cryocoolers Operating Instructions version 6” [Online].Available:
<http://www.sunpowerinc.com/library/pdf/CryoTel%20CT%20user%20manual%20version%206%20042710.pdf>
- [14] Sunpower Inc. 2010. “CryoTel® GT Family Free-Piston Stirling Cryocoolers Operating Instructions version 5” [Online].Available:
<http://www.sunpowerinc.com/library/pdf/CryoTel%20GT%20Manual%20version%205%20110110.pdf>
- [15] Infinia Corp,lne. 2010. “The PowerDish” [Online].Available:
<http://thepowerdish.com/media/pdf/001.pdf>
- [16] Infinia Corp,lne. 2010. “30 kW Maintenance Free Stirling Engine for High Performance Dish Concentrating Solar Power” [Online].Available:
http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/csp_prm2010_infinia_30kw.pdf
- [17] Sutapat Kwankaomeng. 2008. “Design of A Free-Piston Stirling Engine-Pump” ,Mechanical Engineering at the University of Wisconsin-Madison
- [18] G.Walker, Stirling-cycle machines, Clarendon Press. Oxford, 1973



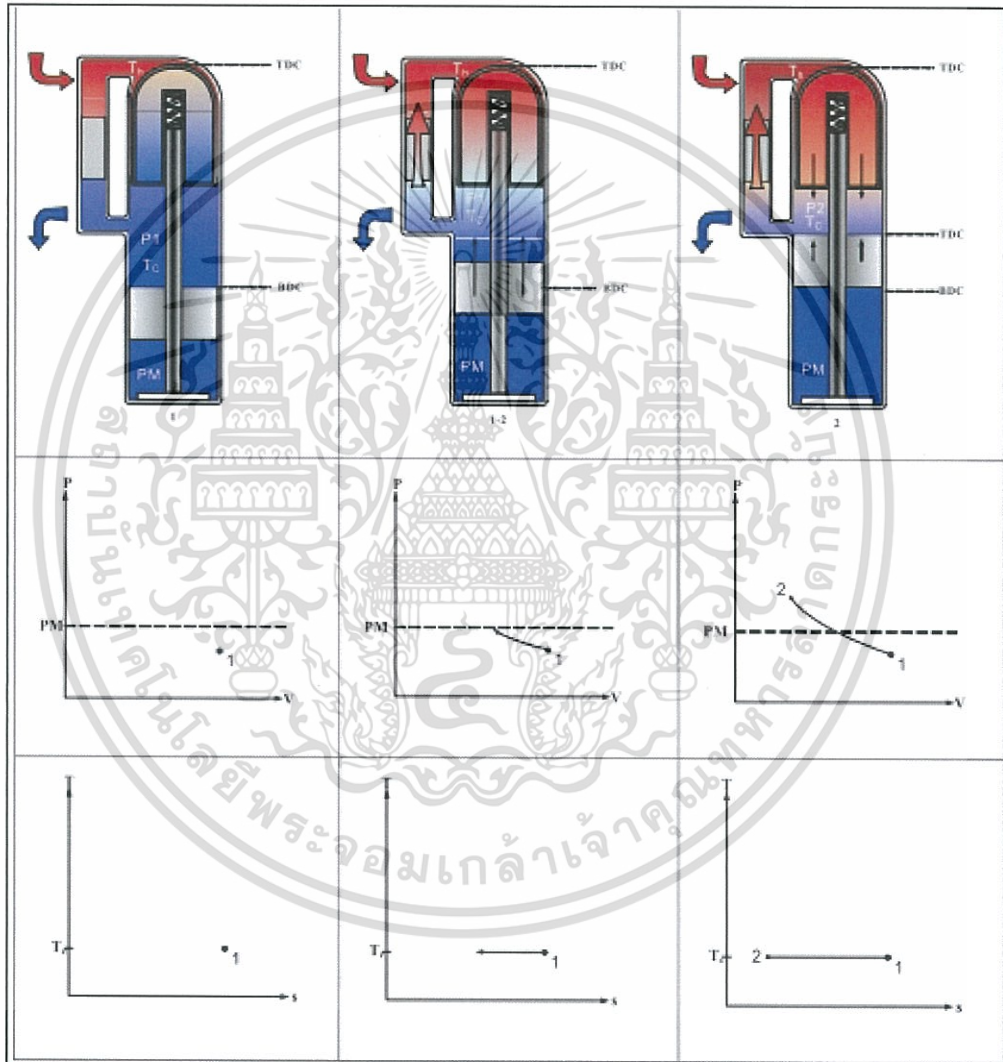
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.กระบวนการอัด 1-2

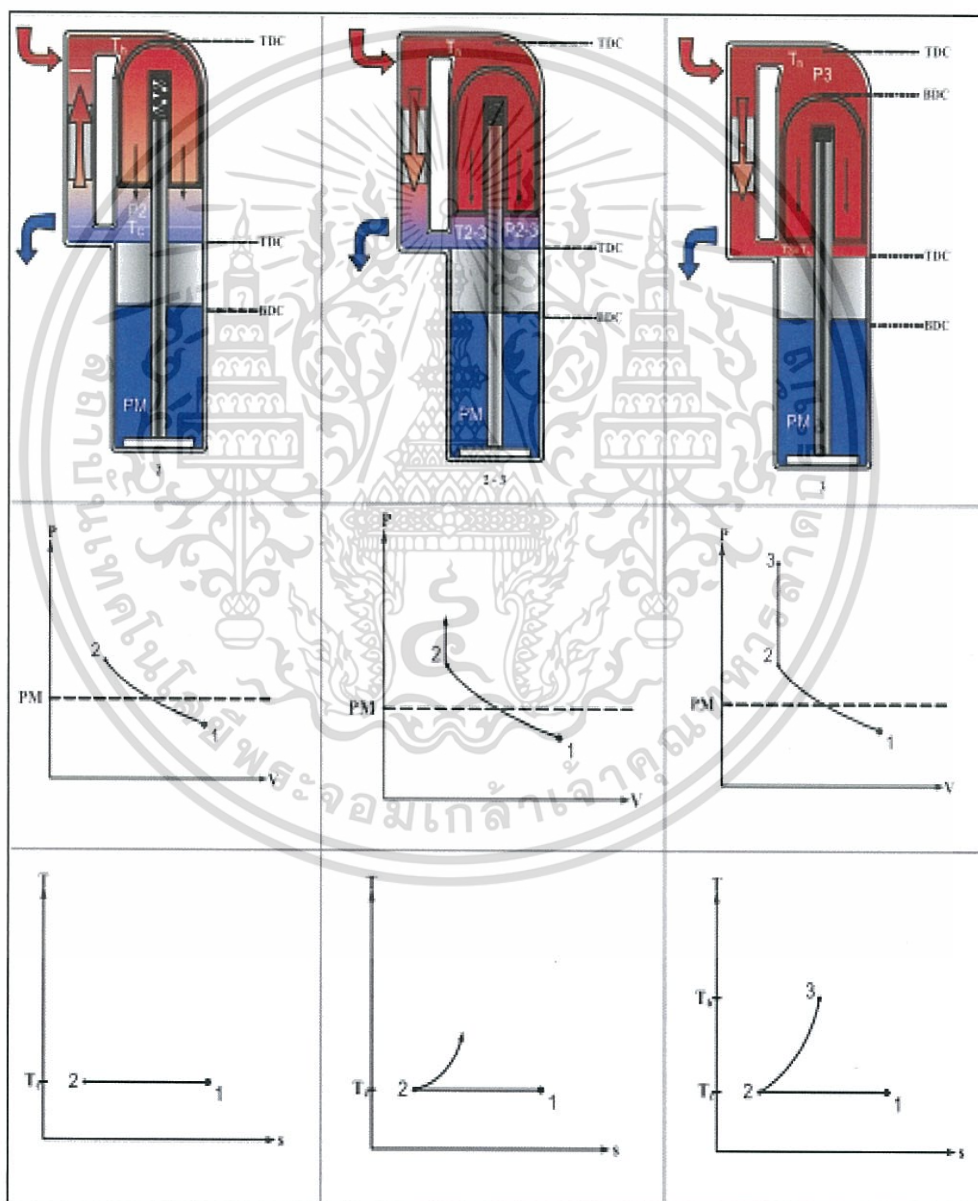
เริ่มต้นที่ 1-2 ลูกสูบกำลังในส่วนปริมาตรอัดจะค่อยๆเคลื่อนที่มาอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน ส่วนลูกสูบติสเพเซอร์ ในส่วนปริมาตรขยายอยู่นิ่ง สารทำงานจะถูกอัดในส่วนปริมาตรอัดทำให้ความดันเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิจะคงที่เพราะมีการคายความร้อนจากปริมาตรอัดมายังสิ่งแวดล้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.กระบวนการขยายตัว 2-3

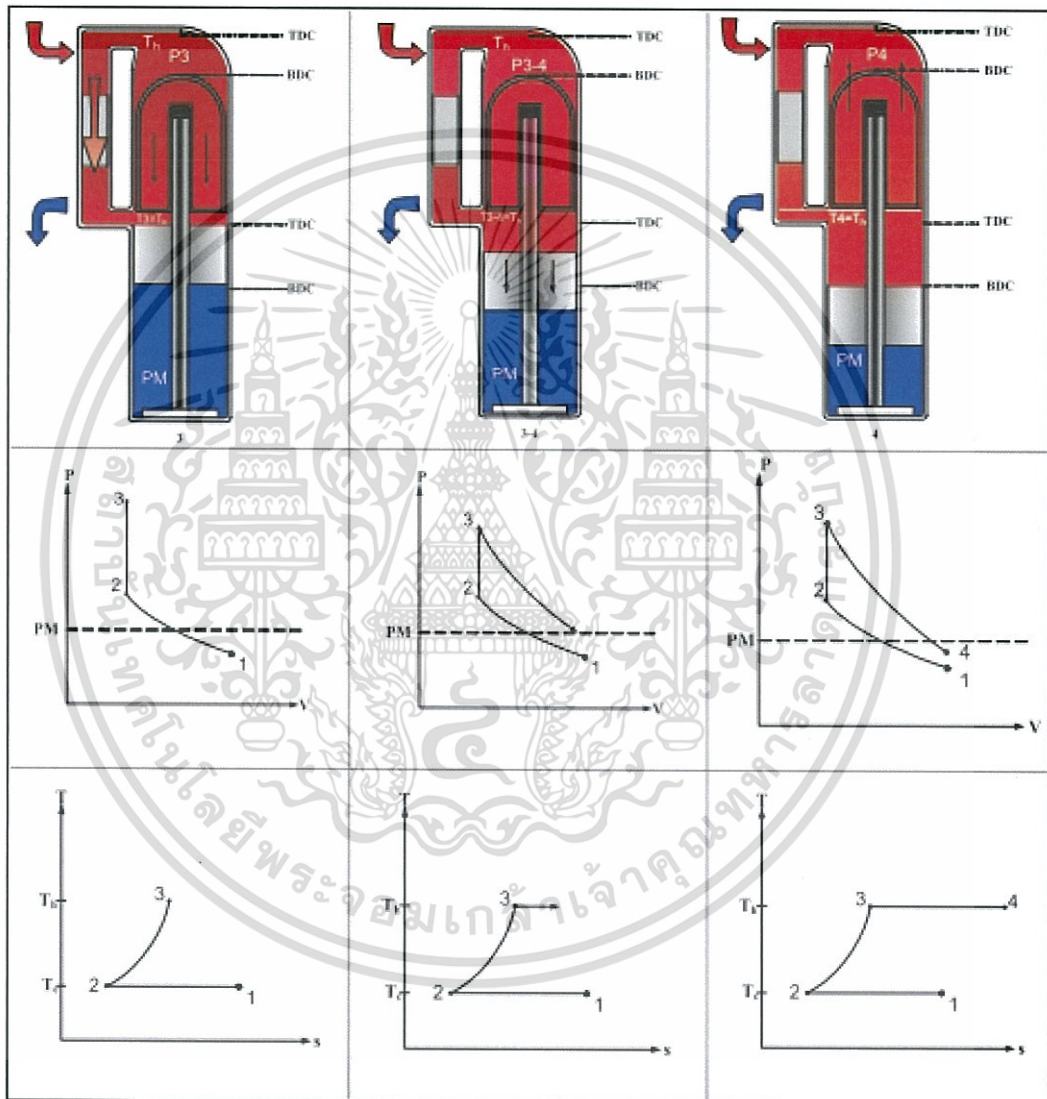
เริ่มต้นที่ 2-3 ลูกสูบดีเซลเซอร์ที่อยู่ในส่วนปริมาตรอัดและปริมาตรขยายจะเคลื่อนที่พร้อมๆกันโดยลูกสูบกำลังที่อยู่ในปริมาตรอัดจะเคลื่อนที่ไปยังรีเจเนอเรเตอร์ (ลูกสูบที่อยู่ในปริมาตรขยายจะเคลื่อนที่ออกไปจากรีเจเนอเรเตอร์) ทำให้ปริมาตรในขบวนการนี้คงที่ สารทำงานจะเคลื่อนที่จากส่วนปริมาตรอัดผ่านรีเจเนอเรเตอร์มายังส่วนปริมาตรขยาย ซึ่งเดิมมีอุณหภูมิต่ำจะค่อยเปลี่ยนเป็นอุณหภูมิสูงโดยจะได้รับการถ่ายเทความร้อนจากรีเจเนอเรเตอร์ ขบวนการนี้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาตรคงที่และความดันเพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.กระบวนการอัด 3-4

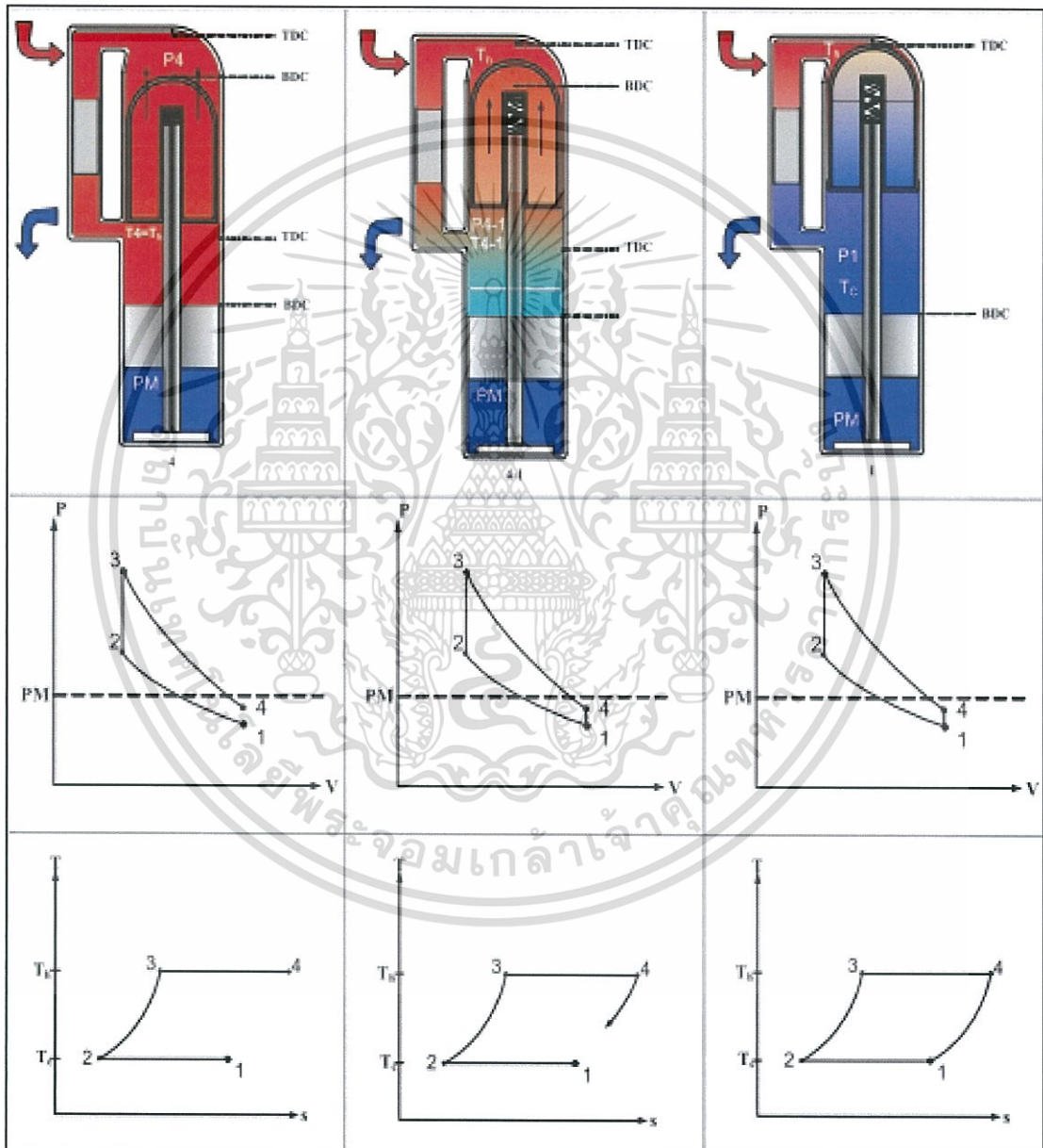
เริ่มต้นที่ 3-4 ลูกสูบดีเซลเพสเซอร์ที่อยู่ในปริมาตรขยายค่อยๆเคลื่อนตัวออกจากรีเจนเนอเรเตอร์ไปยังศูนย์ตายล่าง ขณะที่ลูกสูบกำลังในส่วนอัดอยู่นิ่งที่ศูนย์ตายบน (ติดกับรีเจนเนอเรเตอร์) ขบวนการนี้ความดันลดลง ขณะที่ปริมาตรสูงขึ้น อุณหภูมิมีค่าคงที่เพราะมีการได้รับความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนภายนอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 กระบวนการขยาย 4-1

การสุดท้ายในวัฏจักรเริ่มต้นที่ 4-1 ในระหว่างที่ลูกสูบทั้งสองกำลังเคลื่อนที่กลับพร้อมๆกัน สารทำงานจะเคลื่อนที่ผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ (ปริมาตรคงที่) ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากสารทำงานสู่รีเจนเนอเรเตอร์ ทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิลดลงจนอุณหภูมิต่ำสุด ความร้อนที่ถูกถ่ายเทสู่รีเจนเนอเรเตอร์นั้นจะถูกใช้ในขบวนการ (2-3) เพื่อถ่ายเทความร้อนสู่สารทำงานอีกครั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 แสดงผลลัพธ์จากการทดสอบหาความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์ครั้งที่ 1

แรงดันไฟฟ้า	220	v
กระแสไฟฟ้า	2.3	A
กำลังไฟฟ้า	506	w
Qf	506	J/s
No.	Time	T1
1	0	50
2	10	55
3	20	60
4	30	65
5	40	66
6	50	72
7	60	76
8	70	80
9	80	83
10	90	87
11	100	92

mw	260	g
Cp	4186	J/kg K
(DT/Dt)	0.406	C/s
Qin	441.87416	J/s
EH	87.3269091	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 แสดงผลลัพธ์จากการทดสอบหาความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์ครั้งที่ 2

แรงดันไฟฟ้า	220	v
กระแสไฟฟ้า	2.18	A
กำลังไฟฟ้า	479.6	w
Qf	479.6	J/s

mw	260	g
Cp	4186	J/kg K
(DT/Dt)	0.404	C/s
Qin	439.6974	J/s
EH	91.68003	%

No.	Time	T1
1	0	50
2	10	54
3	20	64
4	30	68
5	40	73
6	50	75
7	60	79
8	70	81
9	80	85
10	90	89
11	100	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 แสดงผลลัพธ์จากการทดสอบหาความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์ครั้งที่ 3

แรงดันไฟฟ้า	220	v
กระแสไฟฟ้า	2.16	A
กำลังไฟฟ้า	475.2	w
Qf	475.2	J/s

mw	260	g
Cp	4186	J/kg K
(DT/Dt)	0.401	C/s
Qin	436.4324	J/s
EH	91.84183	%

No.	Time	T1
1	0	50
2	10	54
3	20	59
4	30	63
5	40	67
6	50	71
7	60	75
8	70	78
9	80	81
10	90	86
11	100	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 แสดงผลลัพธ์จากการทดสอบหาความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์ครั้งที่ 4

แรงดันไฟฟ้า	220	v		mw	260	g
กระแสไฟฟ้า	2.15	A		Cp	4186	J/kg K
กำลังไฟฟ้า	473	w		(DT/Dt)	0.41	C/s
Qf	473	J/s		Qin	446.2276	J/s
				EH	94.33987	%

No.	Time	T1
1	0	50
2	10	52
3	20	59
4	30	62
5	40	65
6	50	71
7	60	73
8	70	76
9	80	81
10	90	87
11	100	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 แสดงผลการทดสอบทางไฟฟ้าของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเคลื่อนที่อิสระ
ขนาดสามิต

เวลา,min	ความถี่ของเครื่องยนต์,Hz	กระแสไฟฟ้า,mA	แรงดันไฟฟ้า,V	กำลังไฟฟ้า,W
0	0	0	0	0
1	5.94	49	1.55	0.076
2	5.96	130	2.19	0.285
3	5.97	109	1.53	0.167
4	6.06	237	1.64	0.389
5	6.06	215	1.30	0.280
6	6.07	244	1.32	0.322
7	6.08	218	1.86	0.405
8	6.15	285	2.07	0.590
9	6.17	289	1.88	0.543
10	6.18	266	2.04	0.543
11	6.19	208	2.18	0.453
12	6.20	301	2.04	0.614
13	6.20	315	2.05	0.646
14	6.20	322	1.95	0.628
15	6.21	305	2.04	0.622
16	6.22	299	2.06	0.616
17	6.24	313	2.05	0.642
18	6.27	277	2.05	0.568
19	6.27	316	2.02	0.638
20	6.28	287	2.02	0.580
21	6.29	309	1.99	0.615
22	6.29	314	1.87	0.587
23	6.29	290	2.00	0.580
24	6.30	292	2.05	0.599
25	6.30	289	2.05	0.592
26	6.30	305	2.04	0.622
27	6.30	283	2.02	0.572
28	6.31	256	2.03	0.520
29	6.31	299	1.97	0.589
30	6.32	306	2.04	0.624
31	6.32	300	2.06	0.618

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32	6.33	312	2.05	0.583
33	6.33	306	2.09	0.640
34	6.33	311	2.08	0.647
35	6.34	318	1.92	0.611
36	6.34	308	2.02	0.622
37	6.35	312	2.02	0.630
38	6.35	277	1.99	0.551
39	6.36	308	1.95	0.601
40	6.37	287	2.01	0.577
41	6.38	253	2.09	0.529
42	6.38	252	2.05	0.517
43	6.39	308	1.95	0.601
44	6.39	300	1.99	0.597
45	6.39	323	2.03	0.656
46	6.43	282	2.08	0.587
47	6.43	278	2.00	0.556
48	6.44	318	2.04	0.649
49	6.44	309	2.01	0.621
50	6.48	295	1.89	0.558
51	6.51	283	1.98	0.560
52	6.53	233	2.13	0.496
53	6.53	288	1.89	0.544
54	6.54	253	1.98	0.501
55	6.55	236	1.76	0.415
56	6.57	290	1.95	0.566
57	6.57	196	1.81	0.355
58	6.62	247	1.71	0.422
59	6.62	216	2.01	0.434
60	6.63	276	1.67	0.461
61	6.63	172	2.05	0.353
62	6.64	251	1.88	0.472
63	6.65	174	2.02	0.351
64	6.66	273	1.94	0.530
65	6.67	196	1.81	0.355
66	6.72	152	1.56	0.237
67	6.77	147	1.48	0.218

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

68	6.78	212	2.04	0.432
69	6.79	110	1.88	0.207
70	6.79	132	1.48	0.195
71	6.91	131	1.81	0.237
72	6.91	174	1.61	0.280
73	6.91	169	1.98	0.335
74	6.93	116	2.29	0.266
75	6.95	186	1.93	0.359
76	6.96	111	2.03	0.225
77	7.02	63	1.76	0.111



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค 1 แสดงคุณสมบัติของอลูมิเนียม 7075 ที่ใช้ทำชิ้นเครื่องยนต์

The screenshot displays the ANSYS software interface. On the left, a list of materials is shown, with '7075-O (SS)' selected. The right pane shows the 'Properties' dialog box for this material. The 'Material properties' section includes fields for Model Type (Linear Elastic Isotropic), Units (SI - N/m² (Pa)), Category (Aluminium Alloys), Name (7075-O (SS)), Default Failure Criterion (Max von Mises Stress), and Sustainability (Defined). Below this is a table of material properties.

Property	Value	Units
Elastic Modulus in X	7.19999992e+010	N/m ²
Poisson's Ratio in XY	0.33	N/A
Shear Modulus in XY	2.689999969e+010	N/m ²
Mass Density	2810	kg/m ³
Tensile Strength in X	219999997.9	N/m ²
Compressive Strength in X		N/m ²
Yield Strength	94999999.42	N/m ²
Thermal Expansion Coefficient in X	2.4e-005	/K
Thermal Conductivity in X	173	W/(m·K)
Specific Heat	960	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 แสดงคุณสมบัติของสแตนเลส 304 ที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องยนต์

The screenshot displays a software interface for material selection and property viewing. On the left, a tree view under 'Steel' lists various materials, with 'AISI 304' highlighted. On the right, the 'Properties' dialog box is open, showing the 'Material properties' tab. The dialog includes fields for Model Type (Linear Elastic Isotropic), Units (SI - N/m² (Pa)), Category (Steel), Name (AISI 304), Default failure criterion (Max von Mises Stress), and Sustainability (Defined). Below these fields is a table of material properties.

Property	Value	Units
Elastic Modulus	1.9e+011	N/m ²
Poissons Ratio	0.29	N/A
Shear Modulus	7.5e+010	N/m ²
Density	8000	kg/m ³
Tensile Strength	517017000	N/m ²
Compressive Strength in X		N/m ²
Yield Strength	206807000	N/m ²
Thermal Expansion Coefficient	1.8e-005	/K
Thermal Conductivity	18	W/(m·K)
Specific Heat	500	J/(kg·K)
Material Dampinn Ratio		N/A

Buttons at the bottom of the dialog include Apply, Close, Save, Config..., and Help.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**NOVELTY
CLEAN
and SUSTAINABLE**

*International Conference on Agricultural Engineering
March 31 - April 1, 2011
Chalchan Pattaya Resort Hotel, Choburi, Thailand*







*Organized by
Thai Society of Agricultural Engineering (TSAE)
&
Agricultural Engineering Program
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTT)
Bangkok, Thailand*

[Full Text](#)
[Back](#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Abstract International Conference on Agricultural Engineering
"Novelty Clean, And Sustainable"**

PT 012	A Study and Comparison of Mathematical modeling for Drying of Tomato Amin TAHERI-GARAVAND, Shahin RAFIEE, Alireza KEYHANI	Iran	58
PT 013	Removal of Remnant Brilliant Blue Reactive dye from aqueous solution using oil palm fruit fibre: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. Ongbenga Solomon BELLO, Mohd Azmir AHMAD	Malaysia	59
PT 014	Physical properties and mechanical behavior under compressive loading of Green Walnut S. HABIBU, A. JAFARI and H. MOBILI	Iran	60
PT 015	Some Physical and mechanical properties of Hawthorn fruit S. HABIBU, A. JAFARI and H. MOBILI	Iran	61
PT 016	The Effects of Moisture Content on Physical and Mechanical Properties of Walnut Cultivars S. HABIBU, A. JAFARI and H. MOBILI	Iran	62
PT 017	Work Study in Flower Packing House Supakit SAYA SOONTHORN, Michael Ayodele OMODARA and Shreech Niyi OYEWOLE	Thailand	63
PT 018	Wheat Class Identification Using LBP, LSP and LSN Textural Features and Monochromatic Images Mohammad-Hassan Abbaspour-Fard, Alireza Pourreza, Hamidreza Pourreza, Hassan Sadriha	Iran	64
AF 001	Lactic acid bacteria - fish fermented fish with high salt preservation Sukama THIRENCHAI, Satpita CHAITYANAN	Thailand	65
AF 002	Properties of coconut fiber (fish protein) bio-composite with different lignin content Chayanit CHAISARANPAT, Thirawan KUNANOPPARAT and Suwit SIRIWATTANAYODIN	Thailand	66
AF 003	Glass Transition of Cassava Starch during Pre-treatment Dewatering Drying Sawant AICHAYAWANICH, Mantra NOPHARATANA, Anong NOPHARATANA and Warinthorn SONGKASRI	Thailand	67
AM 001	Using the Six Sigma Method to Improve Soil Inversion in Tillage by Moldboard Plow Majid NAMDARI, Shahin RAFIEE and Ali JAFARI	Iran	68
AM 002	The Affect of the Cassava Physical Properties to the Harvester Design Danurat THANGDEE and Serec WONGPICHET	Thailand	69
AM 003	Design, development and performance test of a PTO (power take-off) driven mobile biomass shredder Sylvester A. BADUA, Trance C. Agallo, Victoria T. TAYLAN, Emmanuel V. SICAT and Angelita V. ANGELES	Philippines	70
AM 004	Experimental Investigation of a Frize-Piston Sealing Engine Sutapat KWANKAMENG, Rataning SILPSAKOOLSOOK and Triakorn KAWEEMONGKOLRAI	Thailand	71
AM 005	Sediment Shape Characterization Using Digital Image Processing Bin Prasad SHRESTHA, Laxman POUDEL, Bhakti THAPA and Nabin Kumar SHRESTHA	Nepal	72
AM 006	Modeling Effects of Agricultural Machinery Availability on Sugar beet Yield in Iran Narges BANAEIAN and Morteza ZANGENEH	Iran	73
AM 007	Effect of Agricultural Mechanization on Corn Production of Iran Narges BANAEIAN and Morteza ZANGENEH	Iran	74
AM 008	An analysis of labour and machinery productivities for the major oilseed crops in Iran Seyed Hashem MOUSAVI-AVVAL, Shahin RAFIEE and Ali JAFARI	Iran	75
AM 009	An analysis of agricultural mechanization indicators in sunflower production in Iran Seyed Hashem MOUSAVI-AVVAL, Shahin RAFIEE and Ali JAFARI	Iran	76

[Previous](#) [Back](#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 12th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering
 "International Conference on Agricultural Engineering" (Novelty, Clean and Sustainable)
 Chon-Chan Pattaya Resort, Chonburi, Thailand; 31 March-1 April 2011

Experimental Investigation of a Free-Piston Stirling Engine

Sutapat KWANKAOMENG¹, Banterng SILPSAKOOLSOOK²,
 Tisakorn KAWWEMONGKOLRAT^{*3}

Abstract

A Stirling engine is a hot gas engine that can be used with multi-fuel choices as the heat source. The Stirling engine, therefore, is a potential engine which provides power from biomass, solar energy, or other fuels. The free-piston Stirling engine (FPSE) has good advantage in size over other types of Stirling engines. The FPSE consists of two dynamic pistons, displacer and working piston, reciprocating in along the same cylinder or in-line cylinders resulting in a compact Stirling engine. The objective of this research is to test and evaluate the performance of the FPSE. The FPSE prototype has swept volume of 23 cm³, the displacer and working piston diameter of 4.4 cm and 2.7 cm, respectively, and the displacer and working piston stroke of 2.1 cm and 4 cm, respectively. The prototype is heated by alcohol burner and cooled by air. The engine is pressurized at an atmospheric pressure of air as the working gas. The experimental investigations were conducted in order to obtain the engine characteristics. The testing results of the FPSE showed that the engine obtained output power about 0.1 W at 730 rpm of engine speed with the input heat of 10.45 W.

[Keywords] Free Piston Stirling Engine, Stirling engine, Prototype.

1 Introduction

Global warming and environmental pollutions are continuing affect and become a serious problem. Emission and heat release from energy consumption is one of the major sources that produced by energy conversion system from households, transportations, and industries. Searching renewable or sustainable energy and alternative engines is necessary to obtain efficient engine and compete conventional engine. Stirling engine, first patented by Robert Stirling in 1816, is one of mechanical device that convert heat from multi-fuels to be useful work. Many applications were investigated and integrated with the Stirling engine such as water pump, generator, linear alternator, hydraulic pump and etc.

The basic free-piston Stirling engine, developed by Professor Beale [Walker, 1973] of the University of Ohio in the early 1960s, has potential advantages because it is self-starting, and requires no crank mechanism and is hermetically sealed. His successful invention leads Sun power Inc of Athens, Ohio to produce a free-piston Stirling engine commercially for example: the SUNPOWER SPIKE. The clever design of Sun

power Inc, in using a linear alternator with a free-piston Stirling engine provided high electrical efficiency and long life but the alternator was large and expensive [Graham, et al, 1994; Lane and Beale, 1996; Lane and Beale, 1997].

Wood, et al, [2001] studied the thermodynamic performance and characterization for three models of current Sun power free-piston Stirling engines: 35 We, 80 We and 1.1 kWe. Sun power engines achieve overall efficiencies of greater than 55% of Carnot efficiency. Even though these engines require no further development to achieve their performance targets but also they need to be hermetically sealed for further development. The engines are projected to have specific power values exceeding 90 W/kg in their final hermetic sealed forms. The engine modules are now being integrated in to power generation systems for both military and commercial systems.

Wood and Lane [2003] presented the preliminary design for a linear motion free-piston Stirling engine / blower coupled to a rotary turbine /generator. The design combines several features of prototype free-piston machines that are nearing commercial production. This approach promises to

* Corresponding author, Tel.: (66)89545-4543; Fax: (66)2329-8336 E-mail address: f_ae_49@hotmail.com

¹ Department of Mechanical Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Rd. Ladkrabang 10520, Tel. 0-2329-8351 Fax. 0-2329-8352

² Department of Chemistry, Siam University, Phasiachareon, Bangkok, Thailand, 10160.

³ Department of Mechanical Engineering, Department Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

The 12th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering
 "International Conference on Agricultural Engineering, 2011"
 Novelty, Clean and Sustainable

extend the commercially practical range of free-piston Stirling engine / electric generators. The Stirling driver is comprised of two conventional, displacer types, free-piston engines configured as a dynamically balanced opposed pair. Using the outer face of its power piston, each engine drives a single-acting blower. The single turbine / generator use commercial units and are separate from the engines and connected by ductwork. The engines and turbines utilize the same helium working fluid.

Kim, et al, [2005] proposed the design of an advanced small 35 Watt free-piston Stirling engine with integral linear alternator for space power applications. Notable features of the design are high thermal to electric energy conversion efficiencies (exceeding 50 percent of Carnot) and high specific power (~100 W/kg). The predictions in efficiency and power are reasonable considering recently achieved gains in performance of the larger Sun power EG-1000 engine. Kim, et al, [2005] discussed, that there are significant efficiency advantages when scaling Stirling engine shown in power. The small Stirling engines should have very high thermodynamic performance while maintaining the simplicity and structural reliability of monolithic heater head construction.

Vichaidit, et al, [2009] designed, manufactured and tested the free piston Stirling engine having 46.65 cm³ swept volume. The prototype was operated with temperature in the range of 100 °C – 280 °C at atmospheric pressure. Frequency-stroke characteristics of the engine were measured. The experimental results showed that the maximum output power of 4.69 W was obtained at the hot space and cold space temperature of 163 °C and 40 °C, respectively, and frequency – stroke of 4 Hz and 40 mm, respectively

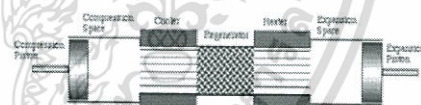
Kwankaomeng and Promvong [2010] presented numerical and experimental study of a free-piston Stirling engine (FPSE) with pneumatic output. A free-piston Stirling engine (FPSE) was designed and manufactured which works at relatively low differential temperature. The FPSE is a beta type configuration. The FPSE couples with a pneumatic cylinder. The hot end of the displacer cylinder was heated with electric heater at 250°C maximum temperature. The other end of the displacer cylinder was cooled with a water circulation having 40°C temperature. The power piston was connected to the piston of pneumatic cylinder for lifting load. The engine was operated at the initial pressure at approximately 6 bars. The testing results showed that the work and power was obtained at 1.5 bars of pressure difference and 120 rpm engine speed of 12.5 N.m and 4 W, respectively, while the work and power, from the simulation results were 15 N.m and 5 W, respectively, at the same operating condition and engine specification.

Although many research works of FPSE have been conducted and developed, this research intends to design small FPSE with reasonable power and efficiency including reliability. This paper presents the preliminary tested of the FPSE prototype under poor operating conditions such as using atmospheric pressurized air as a working gas and alcoholic burner as a heat source.

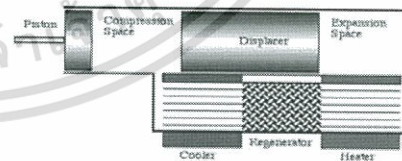
II Engine Configuration and Specification

Stirling engine has major dynamic parts which are two pistons. The light weight piston with loose fitted in the cylinder is called displacer while the close fit piston producing work is called working piston or power piston. The gas inside the engine is circulated between the hot and cold section of engine which are called expansion and compression space, respectively.

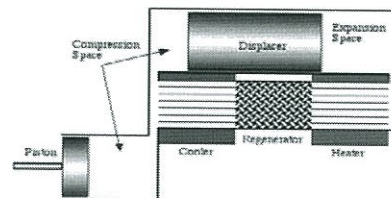
The single acting Stirling cycle engines are typically categorized by structure in three different configurations such as alpha, beta and gamma types as shown in Fig. 1. The alpha feature shown in Fig.1 (a) has two separately cylinders for the expansion and compression spaces and each contain a single piston. The beta form has two pistons sliding in the same cylinder as presented in Fig.1 (b). The gamma configuration consists of two cylinders and two pistons that share the compression space between those two cylinders.



(a) The alpha engine configuration



(b) The beta engine configuration



(c) The gamma Stirling engine configuration

Fig.1. Structure of alpha, beta and gamma

The FPSE components are presented in Fig.2. The motion of the displacer and the working piston are controlled by flow of the working gas between hot and cold spaces or gas expansion and compression zones, respectively. As the working gas expands at the hot space, the displacer moves and compresses the working gas at the cold space pushing the working piston to give power stroke from FPSE. The working piston, hence, can be extracted to be useful work or power. After the working piston gives the power stroke, the displacer and the working piston are returned to restart the new cycle motion by gas spring and bounce chamber, respectively.

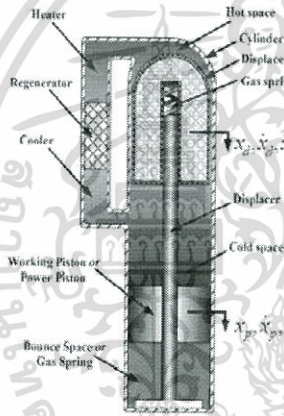


Fig.2 Structure of a free-piston Stirling engine

2.1 The FPSE Prototype

The prototype is manufactured as illustrated in Figs. 3. The engine has four crucial components such as displacer, working piston and two of their cylinders. The power piston and its cylinder are made of brass and stainless steel, respectively, for low friction and durability as depicted in Fig. 4. The aluminum fins around piston cylinder in Fig. 4(b) were shaped for air cooling the compressed gas between the displacer and the working piston. The displacer and its cylinder are fabricated from aluminum and stainless steel, respectively.

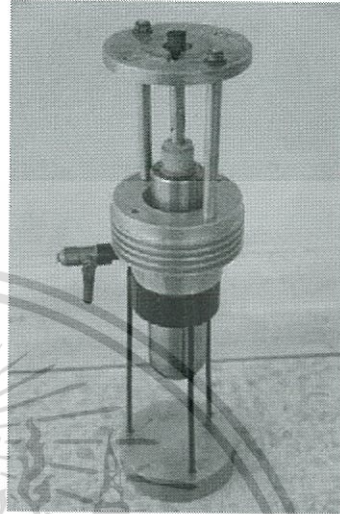
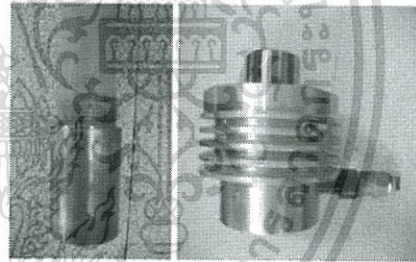
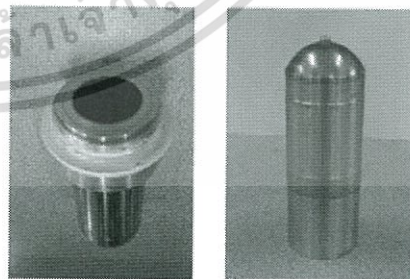


Fig. 3 The FPSE prototype



(a) Power piston (b) Power piston cylinder

Fig. 4 The piston and its cylinder



(a) Displacer (b) Displacer cylinder

Fig. 5 The Displacer and its cylinder

2.2 FPSE Specification

The specifications of the FPSE are given in table 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

volume diagram. The relationship of electric power generation of FPSE and time is provided in Fig.12. Heat loss to the ambient air is the major problem causing low output power.

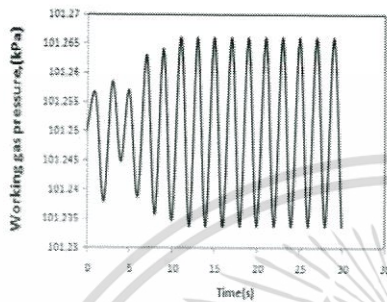


Fig. 10 The working gas pressure of engine with time

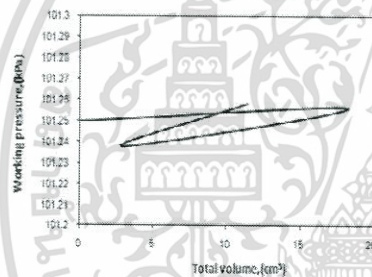


Fig. 11 Pressure-volume diagram of one cycle of engine running

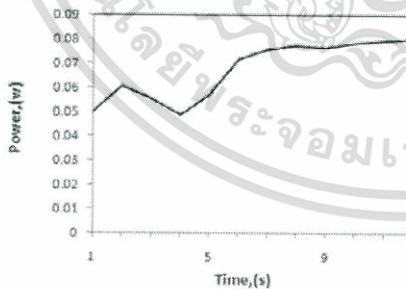


Fig. 12 The relationship of electric power generation of FPSE and time

V. Conclusion

The FPSE prototype was preliminary tested and evaluated engine characteristic and performance. The prototype is heated by alcohol burner and cooled by air. The engine is initially pressurized at 1 bar. The testing results of the FPSE showed that the engine obtained output power about 0.10 W at 730 rpm of engine speed with the input heat of 10.45 W. However, the preliminary tests of the FPSE prototype were

conducted under poor operating conditions such as using atmospheric pressurized air as a working gas and alcohol burner as a low heat source.

References

- Wood, J. G., and Lane, N.W., (2003) Advanced 35 W Free-Piston Stirling Engine for Space Power Applications, CP654, Space Technology and Applications International Forum--STAIF 2003, edited by M.S. El-Genk ©2003 American Institute of Physics 0-7354-0115-2, <http://www.sunpower.com/index.php?pg=25>
- Graham, W., Graham, R., Owen, R.F., and Edward, R.B. (1994) The Stirling Alternative: power systems, refrigerants, and heat pumps, OPA (Amsterdam).
- Wood, J.G, Lane, N.W. and Beale, W.T. (2001) Preliminary Design of a 7 kWe Free-Piston Stirling Engine with Rotary Generator Output. Paper issued in The Proceedings of the 10th International Stirling Engine Conference (10thISEC), 24-27 Sept. 2001, <http://www.sunpower.com/index.php?pg=25>
- Kwankomeng S. and Promvongse P. (2010) Investigation on a Free-Piston Stirling Engine and Pneumatic Output, The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, 20-22 October, Ubon Ratcharhani.
- Lane, N.W. and Beale, W.T. (1996) Free-Piston Stirling Engine-Alternator for Solar Electric Power", 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, October 6-11, Kohn, Germany.
- Lane, N.W. and Beale, W.T. (1997) "Free-Piston Stirling Design Feature", 8th International Stirling Engine Conference, University of Ancona, Italy, May 27-31.
- Kim, S.Y., Huth, J., and Wood, J.G (2005) Performance Characterization of Sun power Free-Piston Stirling Engines. The 3rd International Energy Conversion Engineering Conference, 15-18 August, San Francisco, California. <http://www.sunpower.com/index.php?pg=25>
- Vichaidit, N., Aksompromrat, N., and kijswang, S., (2009) Design and Construction of Free -Piston Type Stirling Engine, Final year project report, Department of Mechanical Engineering, Siam University.
- Walker, G., (1973) Stirling-cycle machines, Clarendon Press, Oxford.

Investigation on Stability and Performance of a Free-Piston Stirling Engine

Sutapat Kwankaomeng¹, Banterng Silpsakulsuk², Tisakorn Kaweemongkolrat¹ and Pongnarin Savangvong¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

² Department of Chemistry, Faculty of Science, Siam University, Bangkok, Thailand, 10160.

ABSTRACT

The stable operation of a free-piston Stirling engine will be achieved when both engine configurations and operating conditions are optimum. This paper presents stability and performance investigation of free-piston Stirling engine. Isothermal analysis is considered in the simulation. Dynamic motion of engine pistons such as the displacer and the power piston are both obtained. For engine design, the optimum parameters are given such as engine specifications, engine characteristics and working conditions to yield the maximum efficiency and reliability. The prototype was built and tested. The comparison of both experimental and simulation results are provided and discussed.

Keyword: Dynamic, Free-piston Stirling engine, Isothermal, Optimum, Stirling engine.

INTRODUCTION

Global warming affects significantly on the current climate in all areas of the world. Many researchers investigated that the increasing of world temperature results from the rise and excess of CO₂ is the major problem because of green house effect. The main source of CO₂ is come from fossil fuel combustion as in automobile, internal combustion engine (ICE) machine, industrial factories, power plants and etc. Fossil fuel, even though, provides such high energy and meets requirement but it also gives CO₂ and pollutions. Alternative and renewable energy, therefore, was used to compensate and reduce excess CO₂ such as biomass and solar energy. Stirling engine, first patented by Robert Stirling in 1816, is a mechanical device that can be used to convert heat from multi-fuels to be useful power without combustion inside the engine and no pollution. Many applications were investigated and integrated with the Stirling engine. Free piston Stirling engine (FPSE) was invented by W. Beale. Modern Stirling engine was developed by using advanced technology materials and manufacturing processes. Consequently, FPSE is a potential and perspective engine for the practical use in both present and future.

Wood J. G. et al, [1] studied the thermodynamic performance and characterization for three models of current Sun power free-piston Stirling engines: 35 W, 80 W and 1.1 kW. Sun power engines achieve overall efficiencies of greater than 55% of Carnot efficiency.

Rogdakis E.D. et al, [2] presented the thermodynamic investigation for the optimization of stable operation of FPSE. The equations of the angular velocity are solved analytically in terms of mass of the working gas and the displacer-piston phase angle of the machine. Using the criterion of stable engine cyclic steady operation, a mathematically rigorous form is obtained for the main parameters of the engine. The thermodynamic magnitudes are obtained by using the Schmidt analysis (isothermal model).

Kim S. Y. et al, [3] proposed the design of an advanced small 35 W- FPSE with integral linear alternator for space power applications. Notable features of the design are high thermal to electric energy conversion efficiencies (exceeding 50 percent of Carnot) and high specific power (~100 W/kg).

Boucher J. et al, [4] presented the dynamic behavior of a dual free-piston Stirling engine (DFPSE) coupled with an asynchronous linear alternator. They evaluated the thermo-mechanical conditions for stable operation of the engine. The DFPSE produces a mechanical power of 1 kW and it has a design operating point of 1.4 MPa corresponding to the frequency about 22 Hz. Helium is the working fluid.

Vichaidit N. et al, [5] designed, manufactured and tested the free piston Stirling engine having 46.65 cm³ swept volume. The prototype was operated with temperature in the range of 100 °C – 280 °C at atmospheric pressure. Frequency-stroke characteristics of the engine were measured. The experimental results showed that the maximum output power of 4.69 W was obtained at the hot space and cold space temperature of 163 °C and 40 °C, respectively, and frequency and stroke of 4 Hz and 40 mm, respectively.

Kwankaomeng S. et al, [6] presented performance of FPSE with the swept volume of 23 cm³. Engine was unpressurized. Air is used as the working gas. The prototype is heated by alcohol burner and cooled by air. The testing results showed that the engine obtained output power about 0.10 W at 730 rpm of engine speed with the input heat rate of 10.45 W. However, the research is only a preliminary experiment to determine the performance of the engine. This study, therefore, was conducted experimental tests in order to evaluate the appropriate value of crucial parameter for the stable operation of the engine.

Corresponding Author: kksudara@kmitl.ac.th

Nomenclature	
A_d	The cross-section area of the displacer (m^2)
A_p	The cross-section area of the piston (m^2)
A_{dr}	The cross-section area of the displacer rod (m^2)
D_d	The damping coefficient of the displacer motion ($N s m^{-1}$)
D_p	The damping coefficient of the piston motion ($N s m^{-1}$)
M_d	The mass of the displacer (kg)
M_p	The mass of the piston (kg)
M	The total mass of the gas in the engine (kg)
P	The instantaneous pressure (Pa)
P_{atm}	The atmosphere pressure (Pa)
P_c	The compression volume pressure (Pa)
P_h	The expansion volume pressure (Pa)
P_{max}	The maximum pressure (Pa)
P_{mean}	The mean pressure (Pa)
P_w	The working volume pressure (Pa)
R	The working gas constant ($J/kg K$)
t	Time (s)
S_d	The stroke of the displacer (m)
S_p	The stroke of the piston (m)
T_c	The cold volume temperature (K)
T_h	The hot volume temperature (K)
T_r	The mean temperature of the regenerative channel (K)
V_c	The volume of the cold space (m^3)
V_h	The volume of the hot space (m^3)
V_{dc}	The dead volume of the cold space (m^3)
V_{dh}	The dead volume of the hot space (m^3)
X	The dead volume ratio
X_d	The displacement of the displacer (m)
X_p	The displacement of the piston (m)
\ddot{x}_d	The acceleration of the displacer (m/s^2)
\ddot{x}_p	The acceleration of the piston (m/s^2)
δ	The calculation parameter
τ	The temperature ratio, T_c/T_h
k	The swept volume ratio, V_c/V_h
α	The phase angle

GENERAL PRINCIPLE

A. Free Piston Stirling Engine Configuration

Stirling engine is hot gas engine which include two dynamic parts, displacer and power piston. The gas inside the engine is circulated by the displacer between the hot and cold sections which are called expansion and compression space, respectively, as illustrated in Fig. 1. Figure 1 shows a free piston Stirling engine with a beta type construction. The displacer and the power piston are incorporated in the same cylinder. The displacer moves the working fluid between the hot space and the cold space inside the cylinder through the heater, regenerator and cooler. The power piston is located at the cold or compression space of the cylinder while the displacer is placed between expansion and compression spaces.

Both displacer and power piston are reciprocated linearly in engine cylinder under gas spring or other spring forces.

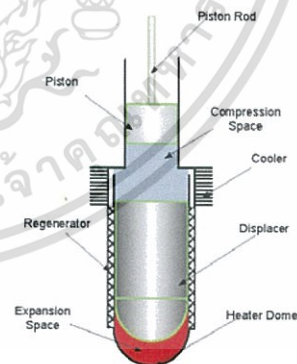


Fig 1 . Schematic of FPSE.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

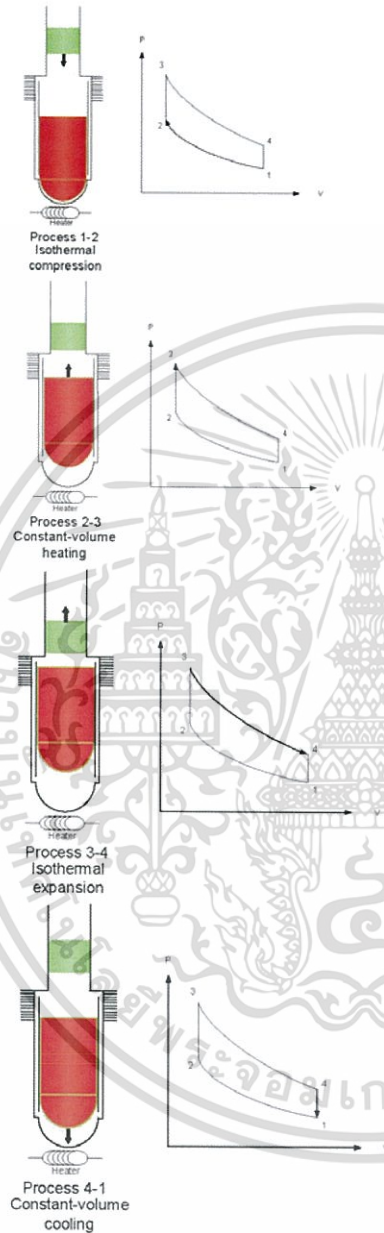


Fig. 2. Stirling Engine Cycle.

B. Stirling Cycle

Stirling cycle as represented in Fig. 2 consists of four processes as following:

Process 1-2: Isothermal compression.

At the beginning of the compression stroke the displacer at BDC held there by its own weight then the power piston is moved down, when it near BDC it compress almost all gas into the displacer cylinder that make pressure increase from 1 to 2 at constant temperature. The work done on the working fluid indicated by the area under process 1-2

Process 2-3: Constant-volume heating

The pressure acting on the displacer is high enough to lift against its own weight, that transfer gas to expansion space, rising the pressure still further so that eventually the displacer is held at TDC. The displacer is pushing the working fluid into the hot space, passing through a regenerator which has stored heat, and already a certain amount is being heated. Heat given up by the regenerator raises the temperature and pressure of the working fluid from 2 to 3 at constant volume, while the power piston remains stationary at its BDC

Process 3-4: Isothermal expansion

After the displacer has pushed all the working fluid into the hot space, with a corresponding increase in pressure to the maximum, it is then kept at rest at its TDC. The working fluid is in the hot space and is expanding to pressure P4, while a constant temperature process 3-4 is maintained at the hot space. The power piston is being pushed from BDC to TDC by the increased pressure, and is applying force to create mechanical energy. The work done by the working fluid is indicated by the area under process 3-4

Process 4-1: Constant-volume cooling

After the power piston has reached its TDC and has supplied its energy to the load, it remains stationary and is ready to travel back to BDC under its own weight and the sucking action of the partial vacuum created by the falling of pressure. The displacer is moving from TDC to BDC and transfer working fluid to the cold space where the pressure will fall and a partial vacuum is created, through the regenerator, causing a fall in temperature and pressure of the working fluid from 4 to 1 at constant volume. Heat is transferred from the working fluid to the regenerator [7].

C. Schmidt's Theory

Schmidt assumptions are typically used in the basic analysis of the Stirling engine operation. The theory provides the harmonic motion of the reciprocating elements and retains the major assumptions of isothermal compression and expansion because of the perfect regenerator assume. It, thus, remains highly idealized, but is certainly more realistic than the ideal Stirling cycle [8].

FREE-PISTON STIRLING ENGINE (FPSE)

A. FPSE Prototype

Free piston Stirling engine was invented by W. Beale. The free piston Stirling engines (FPSEs) have no kinematic mechanism coupling the reciprocating elements

Newton's second law yields:

$$F + F_{\text{spring}} + F_{\text{damping}} = M \cdot \ddot{x} \quad (1)$$

The equations of motion of the dynamic elements are
The piston:

$$M_p \ddot{x}_p = (P_c - P_{\text{atm}})A_p - D_{pd}(\dot{x}_p + \dot{x}_d) \quad (2)$$

The displacer:

$$M_d \ddot{x}_d = (P_h - P_c)A_d + P_c A_{dr} - kX_d - (D_{dp} + D_h)(\dot{x}_p) \quad (3)$$

The sinusoidal displacement and volume variations are given as in equations (4) to (7) as follows:

$$X_d = \frac{1}{2} S_d \cdot \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$X_p = \frac{1}{2} S_p \cdot (\sin(\omega t - \phi)) \quad (5)$$

$$V_h = A_d X_d + V_{dh} \quad (6)$$

$$V_c = A_d S_d - V_h + A_p X_p + V_{dh} \quad (7)$$

B. Thermodynamic Analysis

The approach taken by Schmidt for the analysis follows the isothermal analysis yield the derivation of the pressure and mean pressure given by equation (8) and (9), respectively.

$$P = MR \left(\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_{dc}}{T_c} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_{dh}}{T_h} + \frac{V_h}{T_h} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$P_{\text{mean}} = P_{\text{max}} \left(\frac{1-\delta}{1+\delta} \right)^{1/2} \quad (9)$$

Where

$$\delta = (\tau^2 + k^2 + 2\tau k \cos \alpha) / (\tau + k + 2S) \quad (10)$$

$$S = (2X\tau) / (\tau + 1) \quad (11)$$

$$X = V_{dc} / V_{dh} \quad (12)$$

C. Simulation Results

Figure 6 shows the displacement of the power piston and displacer. Dynamic motion of the displacer and the power piston are assumed sinusoidal function. The displacer and power piston strokes are 40 and 30 mm, respectively. The displacer leads the piston of 90 degree of phase angle.

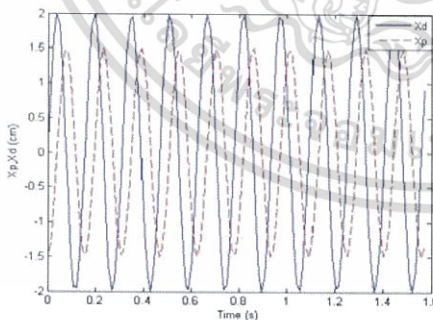


Fig. 6. Piston and displacer stroke at frequency of 6.4 Hz.

The prototype was theoretically investigated using Schmidt's assumptions with initially charging ambient air as the working gas and operated at the hot and cold section temperature of 150 and 40 C, respectively. The PV diagram was obtained as depicted in Fig. 7. The maximum pressure from Schmidt's analysis and experiment result of 146.29 and 134 kPa, respectively.

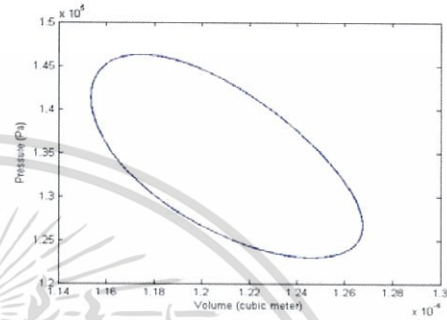


Fig. 7. PV diagram with Schmidt's analysis.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION

A. Experimental Set Up

In order to convert mechanical power to electrical power, the prototype is coupled with linear alternator. Ammeter and voltmeter were used to measure the engine power. Multi-meter was utilized for monitoring the piston reciprocating speed in form of frequency.

The prototype was set up and tested as shown in Fig. 8. Two UT-30C digital multi-meters were used as ammeter and voltmeter. One UN-860C multi-meter was used to measure frequency of the engine.

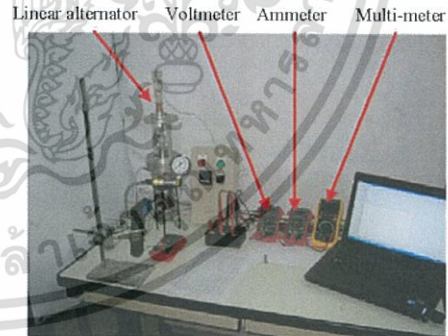


Fig. 8. The FPSE and test equipment.

B. Experimental Result

The preliminary experiment was conducted in order to find the hot temperature, T_h at the heater section of the

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล	นายทศกร กวิมงคลรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	23 มีนาคม 2528
ที่อยู่	408 หมู่1 ตำบลบ่อทอง อำเภอบ่อทอง จังหวัดชลบุรี 20270
ประวัติการศึกษา	2551 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2554 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัย	
พ.ศ.2551	การจำแนกพันธุ์ข้าวในประเทศไทยเฉพาะพันธุ์ที่มีการปลอมปนโดยวิธี Image Processing
พ.ศ.2554	การศึกษาออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ
ผลงานทางวิชาการ	Experimental Investigation of a Free-Piston Stirling Engine “Novelty, Clean and Sustainable” Registration form for International Conference in Agricultural Engineering 31 March-1 April 2011 Cholchan Pataya Resort, Cholburi, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้