การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ : ทฤษฎีและการทดลอง

COMPARISON OF HEAT EFFICIENCY OF GAMMA TYPE STIRLING ENGINE WITH AND WITHOUT REGENERATOR: THEORY AND EXPERIMENT

คนึงชาติ แสนยศ
KHANUENGCHAT SAENYOT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-030-003

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ : ทฤษฎีและการทดลอง

COMPARISON OF HEAT EFFICIENCY OF GAMMA TYPE STIRLING ENGINE WITH AND WITHOUT REGENERATOR: THEORY AND EXPERIMENT

คนึงชาติ แสนยศ
KHANUENGCHAT SAENYOT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-030-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPARISON OF HEAT EFFICIENCY OF GAMMA TYPE STIRLING ENGINE WITH AND WITHOUT REGENERATOR: THEORY AND EXPERIMENT

KHANUENGCHAT SAENYOT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017
KMITL-2017-SC-M-030-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© COPYRIGHT 2017

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ : ทฤษฎีและการทดลอง”
“COMPARISON OF HEAT EFFICIENCY OF GAMMA TYPE STIRLING ENGINE WITH AND WITHOUT REGENERATOR : THEORY AND EXPERIMENT”

ชื่อนักศึกษา นายคนึงชาติ แสนยศ
รหัสประจำตัว 57605078
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กฤษกร โล้เจริญรัตน์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.เชรษฐา รัตนพันธ์ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)	
ดร.บดินทร์ ดำรงศักดิ์ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ	
รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬาภรณ์วลัยลักษณ์ 1 ชั้น 3

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษฎี ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่ 27 **เดือน**.......... **พ.ศ.** 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์: ทฤษฎีและการทดลอง
ชื่อนักศึกษา	นายคนึงชาติ แสนยศ
รหัสนักศึกษา	57605078
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยล้อเกียร์กระตุ้นกำลังแบบคู่ วัสดุที่ใช้การสร้างกระบอกสูบร้อนคือสแตนเลส และกระบอกสูบเย็นคือทองเหลือง จากการวัดอุณหภูมิที่ผิวกระบอกสูบร้อนและกระบอกสูบเย็น (T_H = 547 K และT_C = 307 K) จะได้ว่าค่าของความดัน, ความเร็วรอบ, งานสุทธิ, กำลัง และประสิทธิภาพทางความร้อน มีค่าเท่ากับ 139.03 kPa, 783 RPM, 136.26 mJ, 1.78 W และ 43.87 % ตามลำดับ การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิววัสดุของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ขณะที่เครื่องยนต์ทำงานในระหว่างการทดลองให้ผลที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับแบบจำลองการไหลทางความร้อน จึงได้นำแบบจำลองดังกล่าวนี้มาวิเคราะห์ต่อเพื่อหาประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ จากการวัดอุณหภูมิของอากาศภายในกระบอกสูบ สามารถสรุปได้ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบที่มีรีเจนเนอเรเตอร์สามารถให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนที่สูงกว่าแบบที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ เนื่องจากค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ มีค่าเท่ากับ 52.33 และ 46.46 % ตามลำดับ

คำสำคัญ: การจำลองการไหลทางความร้อน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา รีเจนเนอเรเตอร์ ประสิทธิภาพทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Comparison of Heat Efficiency of Gamma Type Stirling Engine with and without Regenerator: Theory and Experiment
Student Name	Mr. Khaneungchat Saenyot
StudentID	57605078
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Sarai Lekchaum

Abstract

This research is aimed to design and construct the gamma-type Stirling engine twin flywheels with and without regenerator. Stainless steel is used as a hot cylinder and cold cylinder is brass. From the temperature measurement at the hot and cold cylinder surfaces (T_H = 547 K and T_C = 307 K), pressure, engine speed, net work, power and thermal efficiency are 139.03 kPa, 783 RPM, 136.26 mJ, 1.78 W and 43.87 %, respectively. Temperature comparison at the cylinder surfaces is found that Stirling engine with and without regenerator provides the experimental results in the same direction as the heat flow simulation. Therefore it is possible to use the heat flow simulation to determine the thermal efficiency of the engine. From the air temperature measurement inside the cylinders, it is concluded that thermal efficiency of Stirling engine with regenerator is higher than that of Stirling engine without regenerator because the thermal efficiency of Stirling engine with and without regenerator are 52.33 and 46.46 %, respectively.

Keywords: Heat flow simulation, gamma type Stirling engine, regenerator, thermal efficiency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน บุคคลเหล่านั้นไม่เพียงให้คำปรึกษางานวิจัยในระดับปริญญาโทเพียงอย่างเดียวกับข้าพเจ้า แต่ยังส่งเสริมข้าพเจ้าในทุกด้านและบุคคลที่ข้าพเจ้ากำลังจะกล่าวถึงนี้มีพระคุณอย่างยิ่งสำหรับชีวิตภายในและภายนอกสถาบัน ท่านเหล่านี้เปรียบเสมือนคนในครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยแนะนำสิ่งดีๆ และช่วยแก้ปัญหาทางการศึกษาและทางชีวิตของข้าพเจ้าด้วย บุคคลที่ข้าพเจ้ากล่าวถึงมีดังต่อไปนี้

อันดับแรกขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ที่อุปการะข้าพเจ้ามาเป็นนักศึกษาในระดับปริญญาโท นอกจากนั้นยังให้คำปรึกษา อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าในด้านวิชาการและในด้านการดำรงชีวิต ที่สำคัญยิ่งกว่าสิ่งอื่นใดท่านสอนข้าพเจ้าให้แก้ไขตัวข้าพเจ้าเองคำสอนเหล่านั้นคือหลักธรรมทางพุทธศาสนา ท่านได้ใช้แรงกายและแรงใจสั่งสอนจนข้าพเจ้ามีวันนี้ได้

อันดับที่สองขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ผศ.ดร.กฤษกร โล้เจริญรัตน์ ซึ่งเป็นผู้หนึ่งที่ข้าพเจ้าเคารพรักที่และช่วยเหลือข้าพเจ้าทางด้านภาษาอังกฤษและสนับสนุนข้าพเจ้าจนได้ผ่านประสบการณ์ทางด้านต่างประเทศและยังฝึกข้าพเจ้าในการนำเสนองานต่างประเทศ นอกจากนั้นยังคอยให้คำปรึกษากับข้าพเจ้าตลอดมาเมื่อได้ประสบปัญหาและให้กำลังใจข้าพเจ้าตลอด

ถัดมาอันดับที่สามขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบรรดาญาติพี่น้องของข้าพเจ้าซึ่งคอยสนับสนุนเงินทางด้านการศึกษาทั้งตั้งแต่วัยเด็กจนถึงปัจจุบัน นอกจากนี้ยังคอยให้กำลังใจและให้คำแนะนำระหว่างที่ข้าพเจ้าได้เป็นนักศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังข้าพเจ้ามีความรู้สึกทราบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง

อันดับสุดท้ายขอขอบคุณเพื่อนและน้องในภาควิชาที่ทำงานรวมกันตลอดหลายปี ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุนและให้ช่วยเหลือในทุกด้านเมื่อข้าพเจ้าประสบณ์กับปัญหาใดๆ บุคคลเหล่านั้นคือนายกิศติพศ เจียรวัฒนานุกูล นายกิศติพศ ส่งเกียรติวงศ์ นางสาวกมลทิพย์ แก้วบุญเรือง และนางสาวฐิตาภรณ์ เดชโหมด ข้าพเจ้ารู้ทราบซึ้งเป็นอย่างมาก

นายคนึงชาติ แสนยศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิง	8
2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	11
2.4 การถ่ายเทความร้อน	16
2.4.1 การนำความร้อน	16
2.4.2 การพาความร้อน	25
2.4.3 การถ่ายเทความร้อนจากครีบ	27
2.4.4 การไหลแบบลามินาร์และเทอร์บูเลนท์	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	31
3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์	31
3.1.1 การเลือกวัสดุในการใช้สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	31
3.1.2 การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	32
3.2 ทดสอบการทำงานและหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์	38
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	38
3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ	39
3.3 การศึกษาและออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยโปรแกรม SolidWorks	40
3.3.1 วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2 ออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยโปรแกรม SolidWorks 40
3.4 การจำลองการหาค่าอุณหภูมิและความดัน ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในขณะที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 41
3.4.1 การศึกษาการใช้งานเพื่อจำลองการหาอุณหภูมิและความดันด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 41

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 49
4.1 ทดสอบการทำงานหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 49
4.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ระหว่างการทดลองกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 57
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการจำลองการไหลของอากาศที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ระหว่างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 60

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 66
5.1 สรุปผลการวิจัย 66
5.1.1 ผลการทดสอบวัดอุณหภูมิเครื่องยนต์สเตอริงค์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 66
5.1.2 ผลการปรียบเทียบอุณหภูมิการทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์และการทดลอง 66
5.1.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีและไม่มีรีเจอเนอเรเตอร์ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 66
5.2 ข้อเสนอแนะ 67
เอกสารอ้างอิง 68
ภาคผนวก 70
ประวัติผู้เขียน 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน 4
3.1 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุศาสตร์ 32
3.2 พารามิเตอร์(Parameters) ของเครื่องยนต์ 32
4.1 ความดันภายในระบบและปริมาตรขยายที่ค่ามุมข้อเหวี่ยงต่างๆ 52
4.2 แรงที่เกิดจากการเคลื่อนของลูกสูบและแรงบิดกับมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ 55
4.3 เงื่อนไขของการ Flow simulation 57
4.4 อุณหภูมิที่จุด T_F, T_B และ T_C ของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 61
4.5 อุณหภูมิที่จุด T_F, T_B และ T_C ของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 62
ผ.1 ผลการวัดอุณหภูมิ T_1 และ T_2 71
ผ.2 ผลการวัดอุณหภูมิ T_3 และ T_4 74
ผ.3 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 77
ผ.4 ค่าอุณหภูมิ T_2, T_3 และ T_4 จากการ simulation 79
ผ.5 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ณ จุด T_H และ T_C กับเวลา 82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นทางของกระบวนการระหว่างสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 ระหว่างความดันกับปริมาตร	5
2.2 ลักษณะการเกิดกระบวนการแบบ quasi – equilibrium และ nonquasi – equilibrium	6
2.3 Isometric heating process	9
2.4 Isothermal expansion process	9
2.5 Isometric cooling process	9
2.6 Isothermal compression process	9
2.7 แผนภาพ P-V ของวัฏจักรคาร์โนต์และวัฏจักรสเตอร์ลิง	10
2.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	12
2.9 แสดงโครงสร้างและตำแหน่งของระยะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา	13
2.10 การนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมเล็กๆ dx, dy, dz	17
2.11 อัตราการนำความร้อนผ่านปริมาตรเล็กๆที่จุดใดๆในพิกัดทรงกระบอกและทรงกม	21
2.12 ระบบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่	23
2.13 ทรงกระบอกกลวงมีการพาความร้อนที่ผิวทั้งสอง	24
2.14 การพัฒนาชั้นของขอบเขตในการพาความร้อน	26
2.15 การถ่ายเทความร้อนจากครีบจากการพาความร้อน	27
2.16 การถ่ายเทความร้อนออกไปจากครีบโดยการพิจารณาชิ้นส่วนเล็กๆ ของครีบ	28
2.17 การเกิดบาวน์ดารีเลเยอร์ของความเร็วบนแผ่นแบนเรียบ	30
2.18 การแปรเปลี่ยนของ δ และ h สำหรับการไหลผ่านแผ่นแบนเรียบ	30
3.1 สแตนเลส	31
3.2 แก้ว	31
3.3 ทองเหลือง	31
3.4 อะลูมิเนียม	31
3.5 ไม้	31
3.6 ตัวรับความร้อน	33
3.7 ฮีตซิงก์ฝั่งกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์	33
3.8 ลูกสูบกำลัง	34
3.9 ฮีตซิงก์ฝั่งกระบอกสูบกำลัง	34
3.10 ล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง	35
3.11 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์	35
3.12 ฐานรองสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	36
3.13 ก้านชักของทั้งสองลูกสูบ	36
3.14 Vernier Calliper (Mitutoyo)	37
3.15 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่	37
3.16 ตะเกียงแอลกอฮอล์	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 FLUKE 54 II B Thermometer	38
3.18 หัววัดอุณหภูมิ	39
3.19 Digital tachometer (Rang 10 to 99,999 RPM)	39
3.20 โปรแกรม SolidWorks 2015	39
3.21 โครงสร้างเมทริกซ์ Regenerator	40
3.22 Regenerator ลักษณะ Balls ที่มีรูเป็นวงกลม	40
3.23 Regenerator ลักษณะ Foils	41
3.24 Regenerator ลักษณะ Balls ที่มีรูเป็นหกเหลี่ยม	41
3.25 Flow Simulation	41
3.26 หน้าต่างคำสั่ง Wizard	42
3.27 เลือก Unit system	42
3.28 เลือกการทำงาน	43
3.29 เลือกของไหลและประเภทของการไหล	43
3.30 เลือกวัสดุ	44
3.31 กำหนดเงื่อนไข	45
3.32 Mesh	45
3.33 Domain	46
3.34 จำลองปริมาตรเปลวไฟ	46
3.35 Volume Source	47
3.36 Dependency type	47
3.37 Temperature	48
3.38 Pressure	48
4.1 การจัดตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความเร็วรอบ	49
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรขยาย	53
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงกับแรง	56
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงกับแรงบิด	56
4.5 ภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (T_1 เปรียบเสมือนตะเกียงแอลกอฮอล์)	57
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิ T_2 จากการทดลองกับ Flow simulation	58
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิ T_3 จากการทดลองกับ Flow simulation	58
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิ T_4 จากการทดลองกับ Flow simulation	58
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตร ณ เวลา 180 วินาที จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	59
4.10 การไหลของความร้อนภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์	59
4.11 การไหลของความร้อนภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.12 เส้นแสดงอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 60
4.13 การไหลของความร้อนภายใน (ไม่มีกระบอกสูบ) ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 62
4.14 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 63
4.15 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 63
4.16 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในที่จุด T_F ที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 64
4.17 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ที่จุด T_B 64
4.18 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ที่จุด T_C 64
4.19 เส้นแสดงอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 65
4.20 เส้นแสดงอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปี ค.ศ. 1896 Robert Stirling ได้สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling Engine) หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อเครื่องยนต์ความร้อน (Heat engine) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกจากแหล่งกำเนิดความร้อน (Source) ที่มีอุณหภูมิสูง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากเชื้อเพลิง เป็นต้น พลังงานความร้อนจะถูกถ่ายโอนเข้าไปยังของไหลทำงาน (Working fluid) ซึ่งบรรจุอยู่ภายในกระบอกสูบซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อนและคายความร้อนออกในขณะที่ทำงานอยู่ในวัฎจักรด้วยหลักการความต่างของอุณหภูมิระหว่างกระบอกสูบร้อนหรือกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer cylinder) และกระบอกสูบเย็นหรือกระบอกสูบกำลัง (Power cylinder) ของไหลภายในกระบอกสูบจะทำงานอยู่ภายในวัฎจักรและจะกลับคืนสู่สภาวะเดิมอีกครั้งเมื่อสิ้นสุดในแต่ละรอบวัฎจักร ที่จะเรียกว่า “วัฎจักรสเตอร์ลิง (Stirling Cycle)” โดยการทำงานประกอบด้วยกระบวนการผันกลับได้ 4 กระบวนการ คือ กระบวนการที่หนึ่งเป็นกระบวนการขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่ กระบวนการที่สองเป็นกระบวนการรีเจนเนอเรชันที่ปริมาตรคงที่ (การถ่ายโอนความร้อนภายในจากของไหลทำงานไปยังรีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) กระบวนการที่สามเป็นกระบวนการอัดตัวที่อุณหภูมิคงที่(คายความร้อน) และกระบวนการที่สี่เป็นกระบวนการรีเจเนอเรเตอร์ปริมาตรคงที่ (การถ่ายโอนความร้อนภายในรีเจนเนเรเตอร์กลับไปยังของไหลทำงาน) เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาต้นแบบที่กลุ่มวิจัยนี้ได้ออกแบบพัฒนาและสร้างขึ้นมาในแต่ละปีโดยใช้อากาศเป็นสารทำงานด้วยหลักความต่างอุณหภูมิต่ำระหว่างกระบอกสูบนั้นจะประกอบด้วยโครงสร้างที่สำคัญในการทำงานคือ กระบอกสูบดิสเพรสเซอร์ (ฮีตเตอร์และฮีตซิงค์) และลูกสูบดิสเพรสเซอร์ กระบอกสูบกำลัง (ฮีตซิงค์) และลูกสูบกำลัง รัศมีข้อเหวี่ยง ล้อเกียร์กระตุ้นกำลังเดี่ยว และฐานรองรับกระบอกสูบ เป็นต้น [1] ซึ่งพบปัญหาสองข้อคือเมื่อเครื่องยนต์ทำงานจะเกิดการสั่นของล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง และวัสดุที่ใช้ทำกระบอกสูบดิสเพรสเซอร์ กระบอกสูบกำลัง ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกันคือทองเหลือง ดังนั้นปัญหาทั้งสองข้อนี้จึงส่งผลทำให้เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานอาจมีสาเหตุเนื่องจากการสูญเสียแรงที่ใช้ในการหมุนเนื่องจากการไม่สมดุลของแรงของล้อเกียร์กระตุ้นกำลังเดี่ยว และการเกิดการสะสมความร้อนมากเกินที่ผิวหน้าของลูกสูบทำให้ไม่เกิดความต่างของอุณหภูมิระหว่างกระบอกสูบ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของวัฎจักรสเตอร์ลิงคาดว่าจะขึ้นอยู่กับการทำให้เกิดสมดุลของแรงโดยการใช้ล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่เพื่อปรับให้เกิดสมดุลของแรงในขณะทำงาน และเลือกใช้วัสดุทำฮีตเตอร์ต่างชนิดกับตัวฮีตซิงค์ของกระบอกสูบดิสเพรสเซอร์เพื่อทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดความต่างอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ

หลักโครงสร้างพื้นฐานของวัฎจักรสเตอร์ลิงที่มีความซับซ้อนมากในระบบปิดเพื่อให้เข้าใจจะสามารถอธิบายโดยอาศัยเครื่องยนต์สมมติ (Hypothetical engine) กล่าวคือ เครื่องยนต์นี้ประกอบด้วยกระบอกสูบและลูกสูบ 2 กระบอก และมีรีเจนเนอเรเตอร์อยู่ตรงกลางทำหน้าที่เป็นตัวกักเก็บพลังงานความร้อนชั่วคราว (Thermal energy storage device) ตัวรีเจนเนอเรเตอร์อาจเป็นเส้นลวดหรือตะแกรงเซรามิก (Ceramic mesh) หรือวัสดุที่มีรูพรุนชนิดอื่นๆ ซึ่งมีความสามารถในการกักเก็บความร้อนได้สูง (มวล x ความร้อนจำเพาะ) หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะอาศัยหลักความต่างของอุณหภูมิของ 2 กระบอกสูบ คือ เมื่อกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ได้รับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน และมีของไหลทำงานทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของทั้งสองกระบอกสูบโดยที่ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer piston) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนของไหลทำงานหลังจากได้รับความร้อนส่งไปยังลูกสูบกำลัง (Power piston) และลูกสูบกำลังเป็นตัวรับกำลังจากลูกสูบดิสเพลสเซอร์และส่งต่อไปที่ล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง (Flywheel) ทำให้เกิดพลังงานกลในการหมุน ตามปกติเฟสการทำงานของลูกสูบทั้งสองจะต่างกัน 90 องศาจึงทำให้เครื่องยนต์เคลื่อนที่สลับไปมาเป็นวัฏจักรสเตอร์ลิง โดยทั้งสองกระบอกจะมีฮีตซิงก์ (Heat sink) เพื่อระบายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมทำให้ไม่เกิดความร้อนสะสม และอีกส่วนที่สำคัญ คือ รีเจเนอเรเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ระหว่างช่องว่างกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์กับกระบอกสูบกำลัง โดยของไหลทำงานจะไหลผ่านขณะที่เคลื่อนไปมาทั้งสองทิศทางเป็นการนำความร้อนของสารทำงานจากด้านหนึ่งกลับสู่อีกด้านหนึ่ง ดังนั้น รีเจเนอเรเตอร์จะทำหน้าที่รักษาความร้อนในระบบให้คงที่ ไม่เช่นนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทไปกับสิ่งแวดล้อมที่ช่วงระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของวัฏจักรซึ่งผลที่ได้จากการใช้ ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยการนำความร้อนภายในมาใช้ใหม่ไม่เช่นนั้นแล้วความร้อนจะไหลผ่านเครื่องยนต์ไปโดยไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก (Irreversibility) ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมีค่าสูงขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่ไม่มี Regenerator แบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่เพื่อจะปรับไม่ให้เกิดการสั่นของล้อเกียร์ และเลือกใช้วัสดุสองชนิดทำส่วนประกอบของกระบอกสูบดิสเพรสเซอร์ นั่นคือ ในส่วนฮีตเตอร์คือสแตนเลส และส่วนตัวฮีตซิงค์คือทองเหลือง และจะใช้โปรแกรม SolidWorks ออกแบบสร้างโมเดลรีเจเนอเรเตอร์ ที่เหมาะสมให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบชนิดแกมมาที่ไม่มีรีเจเนอเรเตอร์เพื่อช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องยนต์ จากนั้นจะจำลองการไหลของอากาศร้อนในขณะที่มีและไม่มีรีเจเนอเรเตอร์เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ที่ออกแบบให้มีค่าสูงสุดเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยหลักการเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกลของการหมุนสำหรับการผลิตไฟฟ้าได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่ไม่มีรีเจเนอเรเตอร์แบบโครงสร้างล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่

2) เปรียบเทียบอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจเนอเรเตอร์ระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

3) เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนจากการจำลองการไหลของอากาศระหว่างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีและไม่มีรีเจเนอเรเตอร์ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ศึกษาหลักการทำงานและทฤษฎีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่ไม่มีรีเจเนอเรเตอร์แบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่

2) ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่ไม่มีรีเจเนอเรเตอร์แบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่

3) ศึกษาทฤษฎีและการจำลองการไหลของอากาศร้อนด้วยโปรแกรม SolidWorks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ทดสอบและวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ออกแบบและสร้าง

5) ศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจเนอเรเตอร์ระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม SolidWorks

6) ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบโมเดลรีเจเนอเรเตอร์ และจำลองการไหล (Flow simulation) ของอากาศร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ออกแบบและสร้างทั้งที่มีและไม่มี รีเจเนอเรเตอร์ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม SolidWorks

7) วิเคราะห์และเปรียบเทียบหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทั้งที่มีและไม่มีรีเจเนอเรเตอร์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่ที่ไม่มีรีเจเนอเรเตอร์เพื่อออกแบบและสร้าง

ขั้นตอนที่ 2 สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่

ขั้นตอนที่ 3 ทดสอบเครื่องยนต์ที่ออกแบบและสร้าง

ขั้นตอนที่ 4 จำลองการไหลของอากาศร้อนภายในกระบอกสูบด้วยโปรแกรม SolidWorks เพื่อหาอุณหภูมิของตัวเครื่อง

ขั้นตอนที่ 5 ศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจเนอเรเตอร์ระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรม SolidWorks

ขั้นตอนที่ 6 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลสำหรับการออกแบบรีเจเนอเรเตอร์

ขั้นตอนที่ 7 ศึกษาทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนเพื่อออกแบบและสร้างรีเจเนอเรเตอร์

ขั้นตอนที่ 8 ออกแบบโมเดลรีเจเนอเรเตอร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่ด้วยโปรแกรม SolidWorks

ขั้นตอนที่ 9 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่ในขณะที่ไม่มีรีเจเนอเรเตอร์

ขั้นตอนที่ 10 ออกแบบและสร้างโมเดลรีเจเนอเรเตอร์ ในโมเดลเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่และจำลองการไหลของอากาศร้อนด้วยโปรแกรม SolidWork เพื่อหารีเจเนอเรเตอร์ที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์

ขั้นตอนที่ 11 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่ในขณะที่มีรีเจเนอเรเตอร์

ขั้นตอนที่ 12 รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์เพื่อเขียนบทความงานวิจัย 1 เรื่อง

ขั้นตอนที่ 13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ที่มีและไม่มีรีเจเนอเรเตอร์

ขั้นตอนที่ 14 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ขั้นตอนที่ 15 รวบรวมและจัดทำรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2558											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ขั้นตอนที่ 1												
ขั้นตอนที่ 2												
ขั้นตอนที่ 3												
ขั้นตอนที่ 4												
การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2559											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ขั้นตอนที่ 5												
ขั้นตอนที่ 6												
ขั้นตอนที่ 7												
ขั้นตอนที่ 8												
ขั้นตอนที่ 9												
ขั้นตอนที่ 10												
ขั้นตอนที่ 11												
ขั้นตอนที่ 12												
ขั้นตอนที่ 13												
การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2560											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ขั้นตอนที่ 14												
ขั้นตอนที่ 15												

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้แนวทางการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น

2) ได้รับความรู้อย่างถูกต้องในการใช้งานโปรแกรม SolidWorks

3) ได้ความรู้เกี่ยวกับเครื่องมือวัดและการใช้งานอย่างถูกต้องเพื่อนำไปใช้ในการประกอบสัมมาอาชีพ

4) สามารถนำเครื่องยนต์สเตอร์ลิงไปพัฒนาต่อเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและประยุกต์ใช้ร่วมกับจานรวมแสงแบบพาราโบลิคได้ในอนาคตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมื่อปี ค.ศ.1816 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องจักรที่ทำงานตามหลักการของวัฏจักรสเตอร์ลิงถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกโดย บาทหลวง โรเบิร์ต สเตอร์ลิง (Robert Stirling) ชาวสกอตแลนด์ เครื่องยนต์จะเป็นระบบปิดที่มีการสันดาปภายนอก โดยมีของไหลทำงาน (Working fluid) ที่เป็นของไหลอัดตัวได้ เช่น อากาศ ฮีเลียม ไฮโดรเจน ไนโตรเจนหรือไอน้ำ บรรจุภายในกระบอก ในปัจจุบันนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและถูกนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งกำเนิดความร้อนหลายชนิด ได้แก่ ความร้อนจากการเผาไหม้กากของเสียต่างๆ น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซมีเทนจากชีวมวล และความร้อนจากแสงอาทิตย์ ซึ่งมีความน่าสนใจสำหรับเป็นทางเลือกในการผลิตกระแสไฟฟ้า [7, 8, 9]

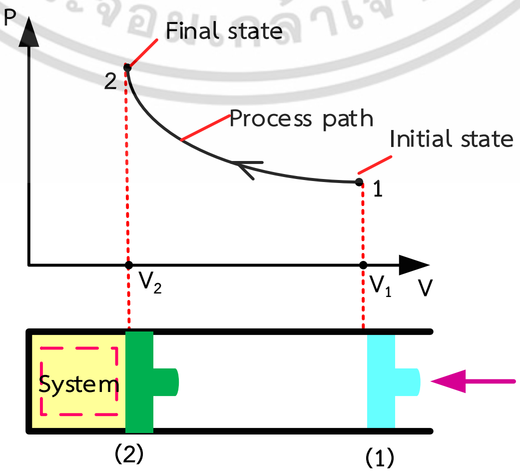
RamlaGheith, FethiAloui and Sassi Ben Nasrallah (2011) [10] ได้ทำการออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์สำหรับสเตอร์ลิงชนิดแกมมาและทำการทดลองเพื่อหาวัสดุที่เหมาะสำหรับการนำมาทำรีเจนเนอเรเตอร์ โดยเลือกใช้วัสดุในการทดลอง คือ สแตนเลส ทองแดง อะลูมิเนียม และ Monel 400 โดยทำการทดลองที่เครื่องยนต์ทำงานที่ความดัน 10 bars และความเร็วรอบสูงที่ 600 RPM

Pascal Puech และ Victoria Tishkova [11] ได้วิเคราะห์เกี่ยวกับการรวมกันระหว่างปริมาตรตายและรีเจนเนอเรเตอร์ที่ไม่สมบูรณ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบต่อตัวเก็บความร้อนในรีเจนเนอเรเตอร์และจำนวนโมลของแต่ละปริมาตร โดยการเปรียบเทียบความร้อนที่จัดเก็บไว้และความร้อนที่ถูกกำจัดออกโดยรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยงานสุทธิ

2.1 บทนำ

นิยามที่สำคัญที่อธิบายเกี่ยวกับหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีดังนี้

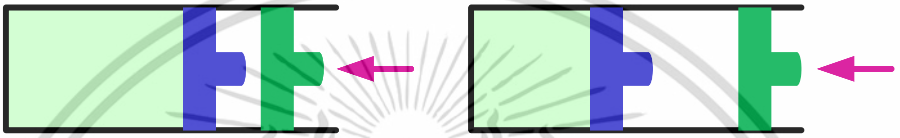
กระบวนการ



รูปที่ 2.1 เส้นทางของกระบวนการระหว่างสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 ระหว่างความดันกับปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ (Processes) คือการเปลี่ยนแปลงของระบบจากสภาวะหนึ่งไปยังอีกสภาวะหนึ่งภายใต้การขยายตัวหรือการอัดตัวของของไหลทำงานในกระบอกสูบ เป็นต้น ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของระบบอย่างน้อย 1 อย่างขึ้นไป จะถือว่ามีการเปลี่ยนแปลงสภาวะหรือมีกระบวนการเกิดขึ้นทั้งสิ้น สำหรับเส้นทางแสดงสภาวะอย่างต่อเนื่องในระหว่างที่เกิดขึ้นกระบวนการเรียกว่า เส้นทางของกระบวนการ (Process path) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 ก เมื่อกระบวนการดำเนินไปในลักษณะที่ระบบมีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะสมดุลตลอดเวลา กระบวนการเช่นนี้เรียกว่า Quasi – equilibrium process ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยไม่มีส่วนใดของระบบที่เปลี่ยนแปลงเร็วกว่าส่วนอื่นๆ จึงทำให้สามารถประมาณได้ว่าในแต่ละสภาวะที่กระบวนการดำเนินไปนั้นสมบัติต่างๆ เหมือนกันทั่วระบบ ดังนั้นเราสามารถวัดสมบัติที่สภาวะต่างๆ ในขณะที่ระบบดำเนินกระบวนการได้ และทำให้สามารถระบุเส้นทางของกระบวนการได้



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

รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดกระบวนการแบบ Quasi – equilibrium และ Nonquasi – equilibrium

รูปที่ 2.2 ข เมื่อแก๊สในระบบได้รับการกดอัดอย่างรวดเร็ว การกระตุ้นตัวของโมเลกุลของแก๊สในระบบจะไม่สม่ำเสมอกล่าวคือความหนาแน่นของโมเลกุลในบริเวณที่ติดกับลูกสูบจะสูงกว่าในบริเวณที่อยู่ถัดออกไป ทำให้ความดันในบริเวณดังกล่าวสูงกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นสมบัติในแต่ละบริเวณของระบบจึงไม่เหมือนกัน กระบวนการในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Nonquasi – equilibrium process ในกระบวนการเช่นนี้เราไม่สามารถวัดสมบัติที่แน่นอนในสภาวะต่างๆ ในขณะที่ระบบดำเนินกระบวนการได้ ทำให้ไม่สามารถระบุเส้นทางของกระบวนการได้ แต่ทราบเพียงสภาวะเริ่มต้น (Initial state) และสภาวะสุดท้าย (Final state) เท่านั้น

สำหรับ Quasi – equilibrium process เป็นเพียงกระบวนการในทางอุดมคติ (Ideal process) ที่ถูกกำหนดขึ้นในทางทฤษฎีเท่านั้น อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณากระบวนการที่เกิดขึ้นจริงโดยทั่วไปพบว่ามีหลายๆ กระบวนการที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ Quasi – equilibrium process ดังนั้น จึงสามารถกำหนดให้กระบวนการเหล่านั้นมีลักษณะดังกล่าวได้โดยมีข้อผิดพลาดอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ สาเหตุที่ให้ความสนใจ Quasi – equilibrium process เนื่องจากการวิเคราะห์กระบวนการทำได้ง่ายเพราะทราบข้อมูลเส้นทางกระบวนการ นอกจากนี้กระบวนการในลักษณะนี้เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพที่สูงสุดด้วยเหตุนี้จัดเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกระบวนการที่เกิดขึ้นได้จริง (Actual process)

สำหรับกระบวนการที่มีสมบัติบางอย่างคงที่จะมีชื่อเรียกเฉพาะโดยจะมีคำนำหน้าคือ “Iso” เช่น กระบวนการความดันคงที่ (Constant pressure process) เรียกว่า Isobaric process กระบวนการปริมาตรคงที่ (Constant volume process) เรียกว่า Isometric process และกระบวนการอุณหภูมิคงที่ (Constant temperature process) เรียกว่า Isothermal process เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผันกลับได้และกระบวนการผันกลับไม่ได้

กระบวนการที่ผันกลับได้ (Reversible process) นั้นเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ จะผ่านสมดุลย่อยๆ ของระบบจนกระทั่งถึงจุดสุดท้ายของกระบวนการ ซึ่งคือสภาพสุดท้ายของระบบและก็คือจุดสมดุลของระบบนั้นเอง กล่าวคือ ทั้งระบบและสิ่งแวดล้อมจะมีสภาวะเดิมทุกอย่างกลับเข้าสู่สภาวะเริ่มต้นเมื่อกระบวนการผันกลับสิ้นสุดลงซึ่งจะเป็นไปได้ถ้าการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิและการแลกเปลี่ยนงานสุทธิระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมมีค่าเป็นศูนย์สำหรับกระบวนการรวม สำหรับกระบวนการผันกลับไม่ได้ (Irreversible process) ตามปกติแล้วสิ่งแวดล้อมจะต้องมีการทำงานบางอย่างให้แก่ระบบ มิฉะนั้นระบบจะไม่สามารถกลับสู่สภาพเริ่มต้นนั้นได้ กระบวนการที่ไม่สามารถกลับสู่สภาวะเริ่มต้นได้จะเรียกว่า "กระบวนการผันกลับไม่ได้" ปัจจัยที่เป็นสาเหตุทำให้กระบวนการผันกลับไม่ได้จะเรียกว่า Irreversibilities ซึ่งจะประกอบด้วย แรงเสียดทาน (Friction) การขยายตัวอย่างรวดเร็ว (Unrestranined expansion) การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างแหล่งความร้อนสองแหล่งที่มีความต่างอุณหภูมิ (Heat transfer across a finite temperature difference) การเสียสภาพแบบ inelastic ของของแข็ง (Inelastic deformation of solids) และความต้านทานทางไฟฟ้า (Electric resistance) เป็นต้น ตามปกติแล้วกระบวนการผันกลับได้จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงซึ่งจะเห็นว่ากระบวนการผันกลับได้จะเป็นเพียงทางอุดมคติเท่านั้น สำหรับการทำงานของเครื่องยนต์จริงที่เกิดขึ้นในทางธรรมชาติแม้ว่าจะเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้แต่ก็จะถูกสมมุติให้เป็นกระบวนการผันกลับได้ด้วยเหตุผลดังนี้คือเป็นแบบจำลองทางอุดมคติที่กระบวนการจริงสามารถใช้เปรียบเทียบได้และง่ายต่อการวิเคราะห์หรือแก้ปัญหาเนื่องจากระบบจะอยู่ในสภาวะสมดุลตลอดเวลาในระหว่างกระบวนการผันกลับได้ จึงสามารถใช้เป็นค่าจำกัดทางทฤษฎี (Theoretical limits) ของกระบวนการผันกลับไม่ได้ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถทำให้กระบวนการเป็นกระบวนการแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์แต่ก็ยังสามารถสร้างระบบที่มีความใกล้เคียงกับกระบวนการผันกลับได้ซึ่งก็จะได้งานออกมาจากเครื่องยนต์ได้มากขึ้น หรือให้งานแก่เครื่องยนต์ที่ต้องการงานให้น้อยลง จากแนวคิดในกระบวนการผันกลับได้จะก่อให้เกิดนิยามของประสิทธิภาพของกฎข้อที่สอง (Second law efficiency) ของกระบวนการจริง ค่าประสิทธิภาพของกฎข้อที่สองทำให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกันแต่ถูกออกแบบให้ทำงานในลักษณะเดียวกันโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องยนต์นั้นได้ การออกแบบที่ดีจะทำให้มีค่า Irreversibilities ที่ต่ำกว่า และมีค่าประสิทธิภาพของกฎข้อที่สองที่สูงกว่า

กฎทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics)

กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (First law of thermodynamics) "การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน ย่อมจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่นำเข้าระบบ ลบด้วยปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกจากระบบ " ซึ่งทำให้เกิดงานทางกลต่อสิ่งแวดล้อม

กฎข้อที่หนึ่งนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$dU = dQ - dW \qquad ....(2.1)$$

โดยที่ dU คือปริมาณการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ

dQ คือความร้อนที่เข้าสู่ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dW คืองานที่เกิดจากระบบ

กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ (Second law of thermodynamics) “ การเพิ่มขึ้นของเอนโทรปีหรือพลังงานเสียในระบบอิสระ ” สามารถอธิบายได้หลายแบบดังนี้

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

$$\Delta S \geq 0 \qquad \text{........(2.2)}$$

2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สันดาปภายนอก (External combustion engine) เป็นเครื่องยนต์ที่นำเอาผลของการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงให้ถ่ายเทความร้อนไปยังของไหลชนิดที่สองซึ่งใช้เป็นสารทำงานสำหรับผลิตกำลัง ดังนั้นสารทำงานและสารที่เกิดจากการเผาไหม้จึงเป็นของไหลคนละชนิดและถูกแยกออกจากกันโดยผนังความร้อน สารที่เกิดจากการเผาไหม้จึงไม่สัมผัสกับชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอกนี้ ได้แก่ เครื่องจักรไอน้ำ (Steam engine) กังหันไอน้ำ (Steam turbine) และเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling engine)

เครื่องจักสเตอร์ลิงมีการทำงานเป็นลักษณะวนไปมาภายใต้อุณหภูมิต่ำและสูง เรียกว่า วัฏจักรสเตอร์ลิง ซึ่งมีความแตกต่างจากเครื่องจักรสันดาปภายในดังนี้ ก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในกระบอกสูบของเครื่องจักรสเตอร์ลิงจะอยู่ในระบบปิดอยู่ภายในกระบอกสูบ ไม่สามารถรั่วไหลออกมาได้ จึงไม่ต้องมีวาล์วไอเสีย เหมือนกับเครื่องจักรก๊าซโซลีน หรือดีเซล และไม่มีการจุดระเบิดของหัวเทียนหรือน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องจึงเดินเงียบมาก พลังงานของเครื่องจักรสเตอร์ลิงมาจากความร้อนภายนอกกระบอกสูบ จึงไม่มีการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ

วัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling Cycle) ในทางอุดมคติ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในอุดมคติ คือ ไม่มีความฝืดหรือแรงเสียดทาน ที่จุดเคลื่อนที่ต่างๆและชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ต้องมีมวลเบา ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้จากแผนภาพ P-V ปริมาตรภายในเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการหาค่าภายในของรูปทรงเรขาคณิต โดยเริ่มต้นจะสามารถหาค่าความดันของระบบเมื่อมีการกำหนดค่าของปริมาตร (V)
ค่าความดันของเครื่องยนต์สามารถคำนวณให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของสมมติฐานดังนี้

1) ไม่มีการสูญเสียความดันในการแลกเปลี่ยนความร้อนและไม่มีความแตกต่างของความดันภายใน

2) ในกระบวนการบีบอัดและการขยายตัวจะต้องเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

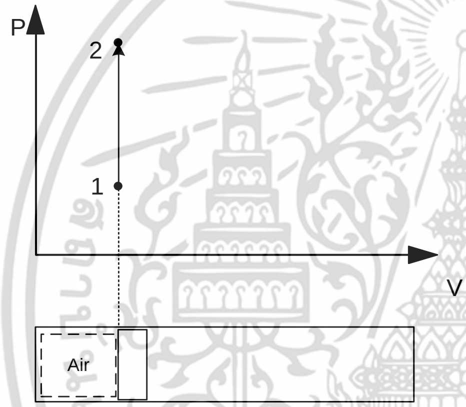
3) เงื่อนไขในการทำงานของก๊าซนั้นจะต้องเปลี่ยนเป็นเงื่อนไขของก๊าซในอุดมคติทั้งหมดและต้องมีการผันกลับที่สมบูรณ์แบบ

4) การขยายตัวของปริมาตรตายจะต้องมีการคงค่าของอุณหภูมิในการขยายตัวของก๊าซและอุณหภูมิในการบีบอัดตัวของก๊าซระหว่างรอบวัฏจักร

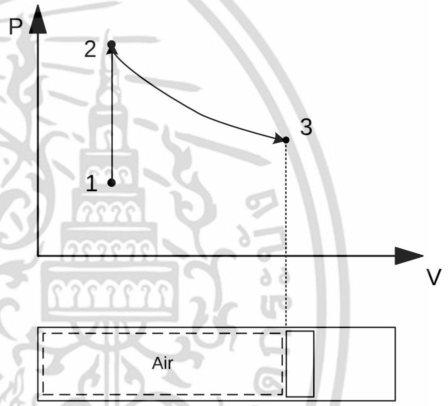
5) อุณหภูมิในการผันกลับของก๊าซจะต้องเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิในการขยายตัวของก๊าซ และอุณหภูมิในการบีบอัดตัวของก๊าซ

6) ปริมาตรของการขยาย และปริมาตรของการบีบอัด จะเปลี่ยนแปลงตามสมการเส้นโค้งแบบไซน์

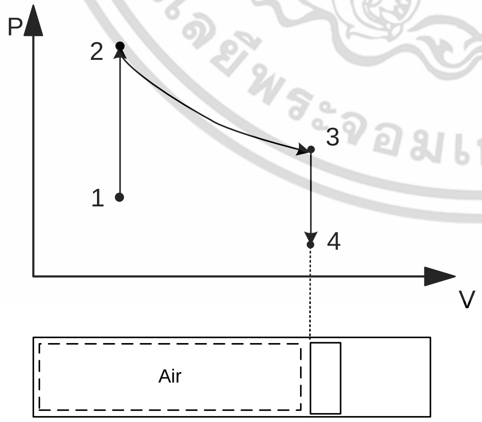
วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติจะประกอบด้วยกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ที่แตกต่างกัน 4 กระบวนการ คือ Isothermal 2 กระบวนการ และ Isometric 2 กระบวนการ ซึ่งกระบวนการในวัฏจักรนี้ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางและทุกกระบวนการจะเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ (Reversible process)



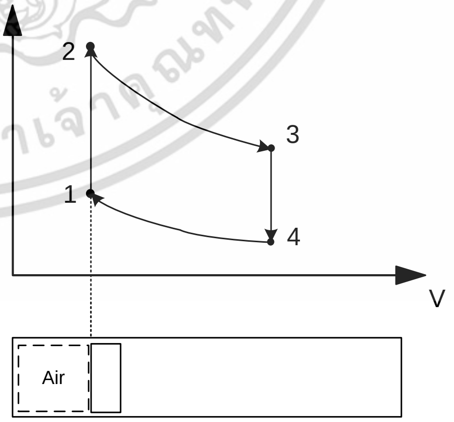
รูปที่ 2.3 Isometric heating process



รูปที่ 2.4 Isothermal expansion process



รูปที่ 2.5 Isometric cooling process



รูปที่ 2.6 Isothermal compression process

กระบวนการ 1-2 คือ ขบวนการที่ปริมาตรคงที่แล้วยังได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดทำให้ความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น เป็นการให้พลังงานความร้อนเข้าสู่ระบบ แสดงดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

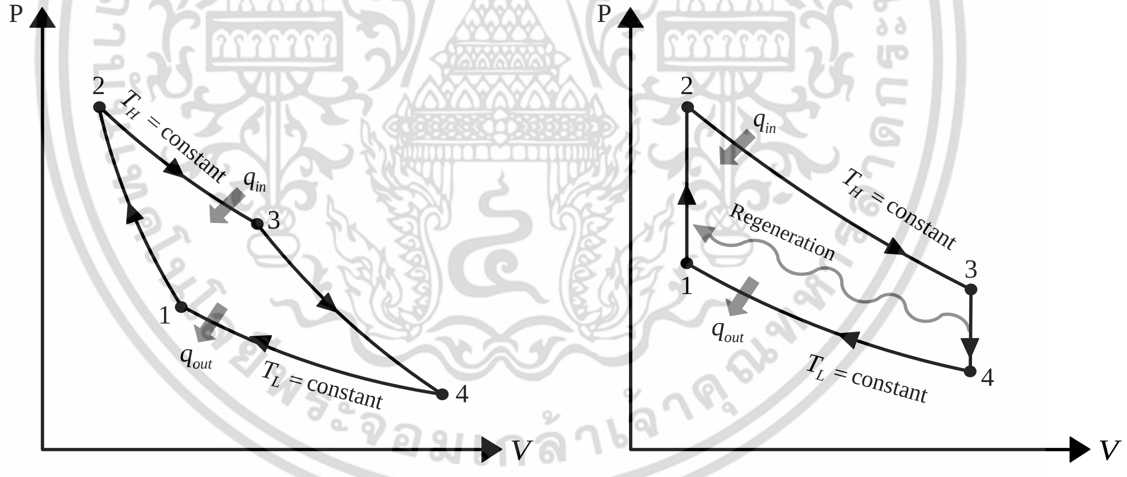
กระบวนการ 2-3 คือ ขบวนการขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่ เป็นการขยายตัวของอากาศภายในกระบอกสูบที่ได้รับความร้อน ในกระบวนการนี้จะได้งานของระบบที่จากการขยายตัว แสดงดังรูปที่ 2.4

กระบวนการ 3-4 คือ ขบวนการที่ปริมาตรคงที่ ความดันลดลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนกลับสู่ธรรมชาติโดยผ่านฮีตซิงก์ ทำให้อากาศภายในเย็นตัวลงความดันจึงลดลง แสดงดังรูปที่ 2.5

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการอัดตัวที่อุณหภูมิคงที่ เกิดจากการคายความร้อนจากกระบวนการ 3-4 ทำให้เกิดการบีบอัดตัวของอากาศ ในกระบวนการนี้จะได้งานจากการอัดตัวของอากาศ แสดงดังรูปที่ 2.6

วัฏจักรสเตอร์ลิงที่มีรีเจนเนอเรเตอร์

วัฏจักรสเตอร์ลิงแตกต่างจากวัฏจักรคาร์โนต์ คือ กระบวนการอุณหภูมิคงที่ (Isothermal process) 2 กระบวนการในวัฏจักรคาร์โนต์ถูกแทนที่ด้วยกระบวนการรีเจนเนอเรชันแบบความดันคงที่ (Adiabatic process) 2 กระบวนการ วัฏจักรสเตอร์ลิงจะมีกระบวนการรีเจอเนอเรชัน (Regeneration) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลทำงานไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ในการกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal energy storage device) ที่เรียกว่า รีเจนเนอเรเตอร์ที่เป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรและถ่ายโอนกลับมายังของไหลทำงานที่อีกส่วนหนึ่งของวัฏจักร แสดงดังรูปที่ 2.7



ก. วัฏจักรคาร์โนต์ ข. วัฏจักรสเตอร์ลิง

รูปที่ 2.7 แผนภาพ P-V ของวัฏจักรคาร์โนต์และวัฏจักรสเตอร์ลิง

โดยขณะมีการรับและคายความร้อน กระบวนอัดและขยายตัวจะเกิดที่กระบอกที่มีลูกสูบกำลังหรือกระบอกสูบเย็น (Power piston) ส่วนลูกสูบดิสเพรสเซอร์หรือกระบอกสูบร้อน (Displacer) จะดันแก๊สให้เคลื่อนที่ไปกลับระหว่างส่วนร้อนผ่านรีเจนเนอร์เรเตอร์ และส่วนเย็นที่ปริมาตรคงที่ ในขณะที่มีการไหลของของไหลทำงานระหว่างส่วนร้อนและส่วนเย็น

วัฏจักรสเตอร์ลิงที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการผันกลับได้โดยรวมทั้งหมด 4 กระบวนการ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) กระบวนการให้ความร้อนแบบปริมาตรคงที่ 1-2 (Constant volume heating process 1-2) (ความร้อนถ่ายเทจากรีเจนเนอเรเตอร์สู่สารทำงาน): เมื่อลูกสูบดิสเพรสเซอร์กำลังหยุดนิ่งอยู่ที่ศูนย์ตายบน (TDC) รอคอยการเพิ่มขึ้นของความดันเนื่องจากได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดภายนอก ซึ่งจะมีผลให้สารทำงานเกิดการขยายตัว เมื่อลูกสูบดิสเพรสเซอร์ผลักดันสารทำงานให้ไหลผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งเก็บสะสมความร้อนไว้ภายในไปสู่ฝั่งร้อน ความร้อนจำนวนหนึ่งจะถ่ายเทให้กับสารทำงาน ความร้อนที่รีเจนเนอเรเตอร์จะถ่ายเทให้กับสารทำงานจะทำให้อุณหภูมิและความดันของสารทำงานสูงขึ้นจากสภาวะ 1 ไปยังสภาวะ 2 โดยปริมาตรคงที่ สรุปได้ว่าในกระบวนการนี้ความร้อนที่เก็บสะสมไว้ในรีเจนเนอเรเตอร์ถูกถ่ายเทให้กับสารทำงาน

2) กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ 2-3 (Isothermal expansion process 2-3) (ความร้อนถ่ายเทจากแหล่งความร้อนภายนอกสู่สารทำงานที่อุณหภูมิสูงคงที่): หลังจากที่ความดันเพิ่มขึ้นจนสูงสุด สารทำงานจะอยู่ในฝั่งร้อนและเกิดการขยายตัวไปสู่ความดัน P3 ในขณะที่เกิดกระบวนการให้ความร้อนโดยอุณหภูมิคงที่ 2-3 ในฝั่งร้อนลูกสูบกำลังจะเริ่มถูกผลักดันจากศูนย์ตายบน (TDC) ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) โดยความดันที่เพิ่มขึ้นจะถ่ายทอดกำลังไปยังล้อเกียกระตุ้นกำลัง (Flywheel) ดังนั้นจึงเป็นการสร้างพลังงานกลให้เกิดขึ้น และพลังงานกลนี้จะถูกใช้ประโยชน์โดยตลอดในกระบวนการที่เหลืออยู่ของวัฏจักร งานที่กระทำโดยสารทำงานนี้คือพื้นที่ภายใต้กระบวนการ 2-3

3) กระบวนการระบายความร้อนแบบปริมาตรคงที่ 3-4 (Constant volume cooling process 4-1) (ความร้อนถ่ายเทจากสารทำงานเก็บสะสมใน รีเจนเนอเรเตอร์): หลังจากลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) และถ่ายทอดกำลังไปยังล้อเกียกระตุ้นกำลัง ลูกสูบกำลังหยุดนิ่งและพร้อมที่จะเคลื่อนที่กลับไปยังศูนย์ตายบน (TDC) ภายใต้โมเมนตัมของล้อเกียกระตุ้นกำลังและการดูดของสูญญากาศที่เกิดขึ้นเป็นบางส่วนโดยความดันคงที่ลดลงของสารทำงาน ลูกสูบ Displacer จะเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่าง (BDC) สู่ศูนย์ตายบน (TDC) และผลักดันสารทำงานไปยังช่องเย็น ซึ่งในช่องเย็นนี้ความดันจะลดลงและเกิดสุญญากาศเป็นบางส่วนขึ้น สารทำงานจะถูกผลักดันผ่านรีเจนเนอเรเตอร์เป็นสาเหตุให้อุณหภูมิและความดันของสารทำงานลดลงจากสภาวะที่ 3 เป็นสภาวะที่ 4 โดยปริมาตรคงที่ ความร้อนถูกระบายออกจากสารทำงานไปเก็บสะสมไว้ในรีเจนเนอเรเตอร์

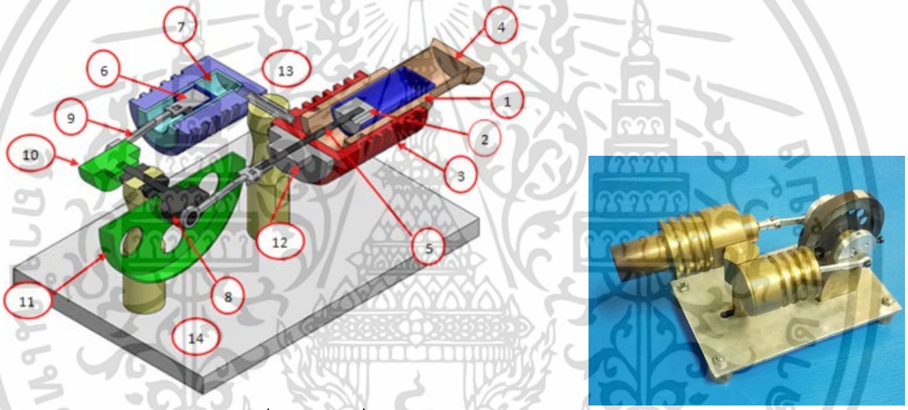
4) กระบวนการอัดแบบอุณหภูมิคงที่ 4-1 (Isothermal compression process 4-1) (ความร้อนถ่ายเทจากสารทำงานอุณหภูมิต่ำสู่แหล่งระบายความร้อนภายนอก): หลังจากที่ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ได้ผลักดันสารทำงานสู่ฝั่งเย็นของกระบอกสูบ ซึ่งสารทำงานจะเย็นตัวลง จากนั้นลูกสูบดิสเพลสเซอร์จะหยุดนิ่งเป็นสภาวะที่ 4 และความดันในสภาวะนี้คือ P4 จากนั้นลูกสูบกำลังจะเริ่มถูกผลักดันจากศูนย์ตายล่าง (BDC) สู่ศูนย์ตายบน (TDC) ด้วยโมเมนตัมของล้อเกียกระตุ้นกำลัง (Flywheel) โดยมีความเป็นสูญญากาศบางส่วนซึ่งเกิดจากการเย็นตัวของสารทำงาน สารทำงานในขณะนี้จะถูกระบายความร้อนออกและอยู่ภายใต้ความกดดันของลูกสูบกำลัง ซึ่งเมื่อถึงศูนย์ตายบน (TDC) ก็จะเป็นการอัดสารทำงานจากสภาวะที่ 4 ถึงสภาวะที่ 1 โดยอุณหภูมิคงที่ งานที่กระทำกับสารทำงานแสดงโดยพื้นที่ภายใต้กราฟของกระบวนการ 4-1

2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาประกอบด้วยลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง ทั้งสองกระบอกสูบแยกจากกันซึ่งจะมีการออกแบบง่ายๆ โดยทั้งสองกระบอกสูบนี้จะเชื่อมต่อถึงกัน การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกกันของกระบอกสูบนี้ทำให้มีการแยกกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน ที่เกี่ยวข้องกับกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และงานที่เกิดขึ้นจากพื้นการบีบอัดและขยายตัวของลูกสูบกำลัง โดยทั่วไปกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์จะมีขนาดใหญ่กว่ากระบอกสูบของลูกสูบกำลังหลายเท่า เป็นผลให้โอกาสการเกิดปริมาตรตายนั้นจะมีมากกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาหรือแบบเบต้า แม้ว่ากระบอกสูบของลูกสูบทั้งสองนี้จะแยกออกจากกันแต่จะมีเพียงกระบอกสูบหนึ่งเท่านั้นที่ต้อง (มีลูกสูบกำลังอยู่ภายใน) ป้องกันการรั่ว นอกจากนี้การแยกกันของกระบอกสูบทั้งสองยังทำให้ลูกสูบกำลังปราศจากปัญหาในเรื่องการสะสมทางความร้อนส่งผลให้มีความแปรปรวนที่เป็นผลจากขนาดกระบอกสูบน้อยลงเนื่องจากการสร้างหรือการขยายตัว การป้อนกันการรั่วนี้จะง่ายกว่าเครื่องยนต์ชนิดอื่นๆ ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกแยกออกจากกระบอกสูบกำลังแต่ก็จะรวมอยู่กับกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าซึ่งการออกแบบและการจัดวางตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะกลายเป็นเรื่องที่ง่ายกว่า จึงทำให้สามารถใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่กว่าและดีกว่าและสามารถใช้ในพื้นที่ต้องการได้



รูปที่ 2.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

จากรูปที่ 2.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา สามารถแบ่งส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์ ได้ดังนี้

(1) กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ คือ กระบอกสูบที่มีลูกสูบดิสเพลสเซอร์อยู่ภายในซึ่งจะเชื่อมต่อกับฮีทเตอร์

(2) ลูกสูบดีสเพลสเซอร์ คือ ลูกสูบที่มีหน้าที่สำหรับไล่อากาศจากฝั่งร้อนไปยังฝั่งเย็น

(3) ฮีตซิงก์ คือ ส่วนที่ช่วยในการระบายความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

(4) ฮีทเตอร์ คือ ส่วนที่รับความร้อนโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อใช้ในกระบวนการบีบอัดและขยายตัวของของไหลทำงานภายในกระบอกสูบ

(5) แกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ คือ ส่วนสำคัญในการรับแรงและส่งแรงให้ข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์

(6) ลูกสูบกำลัง คือ ลูกสูบสำหรับขับกำลังเพื่อส่งต่อไปยังล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง

(7) กระบอกสูบกำลัง คือ กระบอกสูบที่มีลูกสูบกำลังอยู่ภายในซึ่งจะต้องเชื่อมต่อกับกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์

(8) ข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์ คือ ส่วนที่เชื่อมต่อกับแกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์และล้อเกียร์เพื่อ ถ่ายทอดกำลัง

(9) ก้านลูกสูบกำลัง คือ ส่วนสำคัญในการรับแรงและส่งแรงให้ข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(10) ข้อเหวี่ยงสำหรับลูบสูบกำลัง คือ ส่วนที่เชื่อมต่อกับก้านลูกสูบกำลังและล้อเกียร์เพื่อถ่ายทอดกำลัง

(11) ล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง คือ ส่วนที่ใช้ในการสะสมพลังงานจลน์ซึ่งถือว่าเป็นเอาท์พุตของระบบ

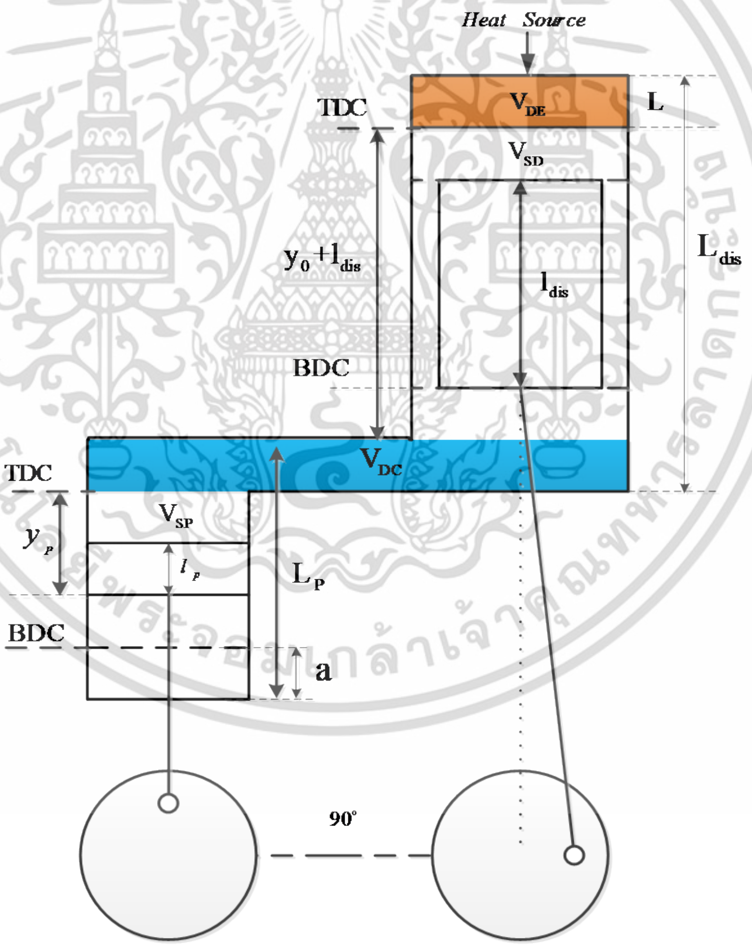
(12) บูท คือ ตัวที่ใช้ซีลเพื่อป้องกันการรั่วของอากาศภายในกระบอกสูบเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความดันภายในกระบอกสูบ

(13) ฐานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ชนิดแกมมา คือ ส่วนที่ใช้ยึดกระบอกสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยภายในจะมีท่อที่ใช้เชื่อมต่อเพื่อแลกเปลี่ยนอากาศระหว่างกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และกระบอกสูบกำลัง

(14) ฐานรับล้อเกียร์ คือ ส่วนที่ใช้ยึดล้อเกียร์กระตุ้นกำลังกับตัวข้อเหวี่ยงดิสเพลสเซอร์และข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง

การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์

ที่มุมข้อเหวี่ยง $r_p = 12$ mm



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างและตำแหน่งของระยะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

อัตราส่วนกำลังอัด (Compression ratio) หาได้ดังสมการ

$$\xi = 1+(V_{SD}/V_{DE}) \qquad \text{.......(2.3)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรรวม (V) ดังรูปที่ 2.10-2.11 จะสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$V = V_E + V_R + V_C \quad \text{........(2.4)}$$

V_R คือ ปริมาตรของรีเจนเนอเรเตอร์

ปริมาตรขยาย (Expansion volume V_E)

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

V_{SD} คือ ปริมาตรการกวาดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร

θ คือ มุมข้อเหวี่ยง

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

V_{DE} คือ ปริมาตรตายของปริมาตรขยาย ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร

D_{dis} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ ในหน่วยมิลลิเมตร

L คือ ความยาวของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ของปริมาตรตาย ในหน่วยมิลลิเมตร

ปริมาตรอัดตัว (Compression volume V_C)

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

V_{SP} คือ ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร

$\varphi = \pi/2$ คือ มุมเฟสการทำงานระหว่างลูกสูบกำลังกับลูกสูบดิสเพลสเซอร์

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

V_{DC} คือ ปริมาตรตายของปริมาตรการอัดตัว ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร

L_{dis} คือ ความยาวของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ ในหน่วยมิลลิเมตร

y_0 คือ ระยะชักของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ในหน่วยมิลลิเมตร

l_{dis} คือ ความยาวของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ในหน่วยมิลลิเมตร

D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบกำลัง ในหน่วยมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L_p คือ ความยาวของกระบอกสูบกำลัง ในหน่วยมิลลิเมตร

l_p คือ ความยาวของลูกสูบกำลัง ในหน่วยมิลลิเมตร

y_p คือ ความยาวของปริมาตรตายของกระบอกสูบกำลัง ในหน่วยมิลลิเมตร

a คือ ความยาวด้านท้ายของกระบอกสูบกำลัง ในหน่วยมิลลิเมตร

ความดันทั้งหมด (Total pressure **P**) ใน 1 รอบวัฏจักรของเครื่องยนต์ ดังนี้

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

เมื่อ p_{mean} = 1.013 bars

λ อัตราส่วนระหว่าง A และ B ซึ่งเขียนได้

$$A = \left(\gamma^2+2(\gamma-1)\chi_s\cos\varphi+\chi_s{}^2-2\gamma+1\right)^{1/2} \qquad ....(2.10)$$

$$B = (\gamma+2\gamma\upsilon+\frac{4\gamma V_R}{1+\gamma}+\chi_s+2\varsigma+1)\,. \qquad ....(2.11)$$

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

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

$\upsilon = V_{DE}/V_{SD}$ และ $\varsigma = V_{DC}/V_{SD}$ คือ อัตราส่วนของปริมาตรขยายและอัดตัวตามลำดับ

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

กำลังเอาต์พุต (Output mechanical power P_s)

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

เมื่อ $f = \frac{N}{60}$.

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

N คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)

τ คือ แรงบิดของเครื่องยนต์ (N-mm)

งานที่เกิดจากการขยายตัวของสารทำงาน หาได้ตามสมการที่

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานที่เกิดจากการอัดตัวของสารทำงาน

$$W_C = \oint PdV_C = \frac{p_{mean} V_{SD} \pi \lambda \gamma \sin\delta}{1+\sqrt{1-\lambda^2}}. \qquad ....(2.15)$$

Beale number B_o คำนวณได้จาก

$$B_o = \frac{P_s}{p_{mean} f V_{DS}}. \qquad ....(2.16)$$

ประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency, η) ใน 1 รอบวัฏจักรหาได้ดังสมการนี้

$$\eta = 1-\gamma. \qquad ....(2.17)$$

2.4 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน สามารถพิจารณาออกได้อย่างเด่นชัดเป็น 3 แบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน ในที่นี้จะขอกล่าวการนำความร้อน และการพาความร้อน ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.4.1 การนำความร้อน (conduction)

การนำความร้อน เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยเคลื่อนที่แบบจลน์ (Kinetic motion) หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะเป็นตัวนำความความร้อนที่ดีด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก ฯลฯ อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายทอดพลังงานความร้อนโดยอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้

กฎสหพันธ์จากการทดลอง ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำเนิดจากบิโอท์ (Biot) แต่ต่อมานักฟิสิกส์ – คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกร์เดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$q_x = -kA\frac{dT}{dx} \quad \text{W} \qquad ....(2.18)$$

หรือ

$$q_x^n = \frac{q_x}{A} = -k\frac{dT}{dx} \quad \text{W/m}^2 \qquad ....(2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

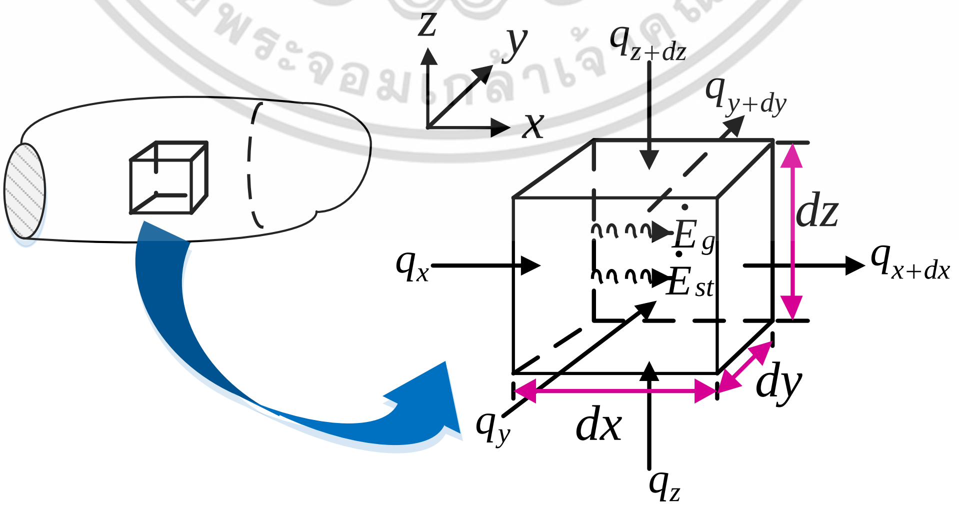
โดยที่ q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x

q''_x คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก x

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ (Thermal conductivity of material) และเป็นค่าบวก

จากสมการที่ (2.19) ถ้าอุณหภูมิลดลงในทิศทางบวก x แล้ว $\frac{dT}{dx}$ เป็นลบ ดังนั้น q''_x (หรือ q_x) มีค่าเป็นบวก เนื่องจากสมการมีเครื่องหมายติดลบอยู่ เพราะฉะนั้นเครื่องหมายลบจึงต้องใส่ในสมการและเพื่อให้แน่ใจว่า q''_x (หรือ q_x) เป็นปริมาณบวก เมื่อการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางบวกของ x ในทางกลับกันเมื่อทางด้านขวามือของสมการเป็นลบ แสดงว่าการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางลบของ x จุดประสงค์หลัก ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหาสนามอุณหภูมิ (Temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขที่สอดคล้องกับขอบเขตของมัน นั่นคือต้องการทราบการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature distribution) เมื่อทราบค่านี้แล้วสามารถหาฟลักซ์ความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้น จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier' s Law) การหาค่านี้ทำโดยการใช้กฎการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอร์เรนเชียลซึ่งกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และใช้สมการอัตราที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการดิฟเฟอร์เรนเชียลซึ่งคำตอบของมันจะให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น

พิจารณาตัวกลางเนื้อเดียวกันซึ่งมีเกรเดียนต์อุณหภูมิจริง และการกระจายตัวของอุณหภูมิ $T(x,y,z)$ กำหนดในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) เรากำหนดปริมาณควบคุมเล็กมากๆ dx, dy, dz ตามที่แสดงในรูปที่ 2.10 ถ้ามีเกร์เดียนต์อุณหภูมิแล้วการนำความร้อนจะเกิดขึ้นข้ามแต่ละอันของผิวควบคุม อัตราการนำความร้อนนี้จะตั้งฉากกับผิวควบคุมแต่ละอันที่ตำแหน่งโคออร์ดิเนต x, y, z ซึ่งแสดงโดยเทอม q_x, q_y, q_z ตามลำดับ อัตราการนำความร้อนที่ผิวตรงข้ามสามารถกระจายโดยอนุกรมเทลเลอร์ (Taylor series expansions) โดยไม่คิดเทอมลำดับสูงๆ (Higher order terms) จะได้



รูปที่ 2.10 การนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมเล็กๆ dx, dy, dz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \qquad \text{........(2.19a)}$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \qquad \text{........(2.19b)}$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \qquad \text{........(2.19c)}$$

ภายในตัวกลางมีแหล่งพลังงานซึ่งสามารถผลิตอัตราพลังงานความร้อนได้ เทอมนี้แทนด้วย

$$\dot{E}_g = \dot{q}\, dxdydz \qquad \text{........(2.20)}$$

โดยที่ $\dot{q}$ คืออัตราพลังงานที่ผลิตขึ้นในตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (W/m^3) นอกจากนี้ก็ยังมีพลังงานซึ่งเก็บไว้โดยวัตถุหรือตัวกลางในปริมาตรควบคุม ซึ่งคือ

$$\dot{E}_{st} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \qquad \text{........(2.21)}$$

โดยที่ $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อเวลาที่เปลี่ยนไป เมื่อใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานกับปริมาตรควบคุมจะได้

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g + \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \qquad \text{........(2.22)}$$

ดังนั้นจะเห็นว่า อัตราการนำความร้อนประกอบด้วยการไหลเข้า $\left(\dot{E}_{in}\right)$ และไหลออก $\left(\dot{E}_{out}\right)$ ของพลังงานและแทนสมการ (2.20) และ (2.21) ได้

$$\left(q_x + q_y + q_z\right) + \dot{q}\, dxdydz - \left(q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz}\right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \qquad \text{........(2.23)}$$

แทนด้วยสมการ (2.19) จะได้

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q}\, dxdydz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \qquad \text{........(2.24)}$$

จากกฎของฟูริเยร์ อัตราการนำความร้อนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_x = -k\,dydz\frac{\partial T}{\partial x},\; q_y = -k\,dxdz\frac{\partial T}{\partial y},\; q_z = -k\,dxdy\frac{\partial T}{\partial z} \qquad ....(2.25)$$

โดยการแทน (2.24) และ (2.25) และหารตลอดด้วยมิติของปริมาตรควบคุม $(dxdydz)$ จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q} = \rho c_p\frac{\partial T}{\partial t} \qquad ....(2.26)$$

สมการ (2.26) เป็นรูปทั่วไปของสมการการฟุ้งกระจายของความร้อน ในพิกัดคาร์ทีเชียน โดยทั่วไปสมการนี้เรียกว่า สมการความร้อน เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์การนำความร้อน จากคำตอบของมัน เราจะได้การกระจายของอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันของเวลา จากสมการความร้อนสามารถกล่าวได้ว่า “ที่จุดใดๆ ในตัวกลางอัตราการนำความร้อนสุทธิในปริมาตรหนึ่งหน่วย รวมกับอัตราการผลิตความร้อนเชิงปริมาตรต้องมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนของพลังงานความร้อนที่สะสมไว้ภายในปริมาตรนั้น”

สำหรับกรณี ค่า $k = const.$ จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad ....(2.27)$$

โดยที่ $\alpha = k/\rho c_p$ เรียกว่า ค่าการฟุ้งกระจายของความร้อน (Thermal diffusivity) ของวัตถุ คุณสมบัติทางเทอร์โมฟิสิกส์ที่สำคัญนี้ก็คือเป็นอัตาส่วนของค่าการนำความร้อน (k) ของวัตถุต่อค่าความจุความร้อน (ρc_p) ค่า α มาก (ค่า k มาก และ/หรือ ρc_p น้อย) หมายความว่า วัตถุมีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนมากกว่าที่พลังงานที่เก็บเอามาไว้มากหรือความร้อนแพร่กระจายตลอดวัตถุอย่างรวดเร็ว มีหน่วยเป็น m^2/s

สมการ (2.27) สามารถแปลงไปอยู่ในรูปพิกัดทรงกระบอกหรือทรงกลมได้โดยใช้แคลคูลัสพื้นฐานซึ่งจะได้ว่า

ในระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinates)

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(k\frac{\partial T}{\partial \phi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q} = \rho c_p\frac{\partial T}{\partial t} \qquad ....(2.28)$$

ในระบบพิกัดทรงกลม (Spherical Coordinates)

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr^2\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(k\frac{\partial T}{\partial \phi}\right)+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(k\sin\theta\frac{\partial T}{\partial \theta}\right)+\dot{q} = \rho c_p\frac{\partial T}{\partial t} \qquad ..... (2.29)$$

ระบบพิกัดของสมการ (2.28) และ (2.29) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติสมการพื้นฐานของการนำความร้อนดังกล่าว จะถูกนำไปใช้งานในแต่ละกรณี ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปแบบของสมการจะสามารถลดรูปสมการพื้นฐานดังกล่าวให้กะทัดรัดยิ่งขึ้นเพื่อนำไปใช้ได้ในงาน ดังนี้

สมการนำความร้อนใน 1 มิติ โดยค่า $k = const.$ คือ

$$\frac{1}{r^n}\left[\frac{\partial\left(r^n \partial T\right)}{\partial r \partial r}\right] + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\infty}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{..... (2.30)}$$

โดยที่

$$n = \begin{cases} 0 & \text{สำหรับระบบพิกัดฉากหรือคาร์ทีเซียน และแทนตัวแปร } r \text{ ด้วย } x \\ 1 & \text{สำหรับระบบพิกัดทรงกระบอก} \\ 2 & \text{สำหรับระบบพิกัดทรงกลม} \end{cases}$$

สมการการนำความร้อนใน 1 มิติ ที่เป็นแบบคงที่สม่ำเสมอ (Steady state) โดยมีแหล่งผลิตความร้อนภายในระบบ จะได้

$$\frac{1}{r^n}\left[\frac{d}{dr}\left(r^n k \frac{dT}{dr}\right)\right] + \dot{q} = 0 \qquad \text{........(2.31)}$$

และกรณีที่ ค่า $k = const.$ สมการ (2.31) ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{r^n}\left[\frac{d}{dr}\left(r^n \frac{dT}{dr}\right)\right] + \dot{q}/k = 0 \qquad \text{........(2.32)}$$

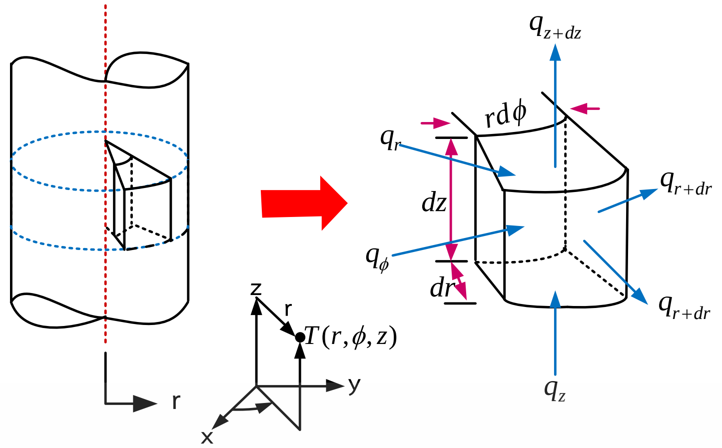
สมการการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอใน 1 มิติ ไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในได้

$$\frac{d}{dr}\left(r^n k \frac{dT}{dr}\right) = 0 \qquad \text{........(2.33)}$$

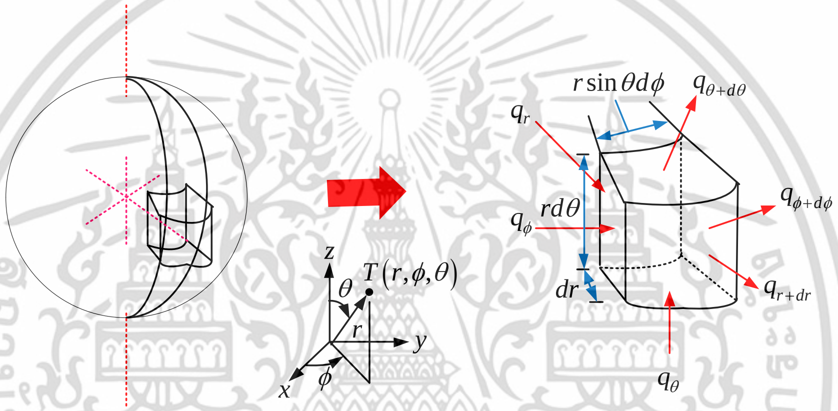
และถ้า ค่า $k = const.$

$$\frac{d}{dr}\left(r^n \frac{dT}{dr}\right) = 0 \qquad \text{........(2.34)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. การนำความร้อนผ่านปริมาตรเล็กๆที่จุดใดๆ ในพิกัดทรงกระบอก (r,ϕ,z)



ข. การนำความร้อนผ่านปริมาตรเล็กๆที่จุดใดๆ ในพิกัดทรงกลม (r,ϕ,θ)

รูปที่ 2.11 อัตราการนำความร้อนผ่านปริมาตรเล็กๆที่จุดใดๆในพิกัดทรงกระบอกและทรงกลม

เงื่อนไขที่ขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary and initial conditions)

ในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการนำความร้อน เราจำเป็นต้องทราบถึงเงื่อนไขที่ขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น เพื่อที่จะนำไปใช้หาค่าคงที่ที่เกิดจากการอินทิเกรตอันจะเป็นผลทำให้คำตอบที่ได้สอดคล้องกับเงื่อนไขทางฟิสิกส์ที่มีจริงที่ขอบของวัตถุ และถ้าสถานการณ์นั้นขึ้นกับเวลาแล้ว เงื่อนไขเริ่มต้นเป็นลักษณะเงื่อนไขที่เกี่ยวกับความร้อนที่ขอบของบริเวณพื้นผิว เช่นที่ขอบของผิวอาจมีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจากของไหลที่ล้อมรอบ หรือทราบอุณหภูมิที่ขอบจากการวัดโดยตรง

ดังนั้นในการวิเคราะห์นี้ เราจะแทนลักษณะของเงื่อนไขที่ขอบเขตต่างๆด้วยสมการที่เหมาะสมทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้กันมากมี 3 แบบ ดังนี้

แบบที่ 1 อุณหภูมิที่ผิวคงที่ (Constant surface temperature)

$$T(x,t)\big|_{x=0} = T(0,t) = T_1 \quad \text{........(2.35a)}$$

$$T(x,t)\big|_{x=L} = T(L,t) = T_2 \quad \text{........(2.35b)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 2 ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant surface heat flux) แยกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวมีค่าจำกัด

ที่ $x = 0$ มีความร้อนไหลเข้า q_0'' W/m^2 ได้

$$-k\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=0} = q_0'' \qquad \text{........(2.36a)}$$

ที่ $x = L$ มีความร้อนไหลเข้า q_L''

$$+k\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=L} = q_L'' \qquad \text{........(2.36b)}$$

เครื่องหมาย – และ + ที่แสดงทางซ้ายมือของสมการทั้งสอง แสดงทิศทางการไหลของความร้อนที่ไหลตามและตรงข้ามระบบพิกัดที่กำหนดตามลำดับ

กรณีที่ 2 ผิวอะเดียแบติกหรือผิวหุ้มฉนวน (Adiabatic or insulated surface) เมื่อการหุ้มฉนวน ความร้อนจะไม่สามารถไหลเข้า – ออก จากระบบได้ เพราะฉะนั้น

$$\text{ที่ } x = 0, \qquad \frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=0} = 0 \qquad \text{..... (2.37a)}$$

$$\text{ที่ } x = L, \qquad \frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=L} = 0 \qquad \text{..... (2.37b)}$$

แบบที่ 3 เงื่อนไขที่ขอบมีการพาความร้อน (Convection surface condition)

พิจารณาสมดุลพลังงานที่ผิว $x = 0$ นั่นคือ

ฟลักซ์ความร้อนที่ถูกพาออกไป = ฟลักซ์ความร้อนที่ถูกนำออกมา

$$h_1\left[T_1 - T(0,t)\right] = -k\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=0} \qquad \text{.......(2.38a)}$$

ทำนองเดียวกันที่ขอบ $x = L$ จะได้

$$h_2\left[T_2 - T(\mathrm{L},t)\right] = +k\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=L} \qquad \text{........(2.38b)}$$

โดยที่ T และ h เป็นค่าอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลที่ล้อมรอบตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอ

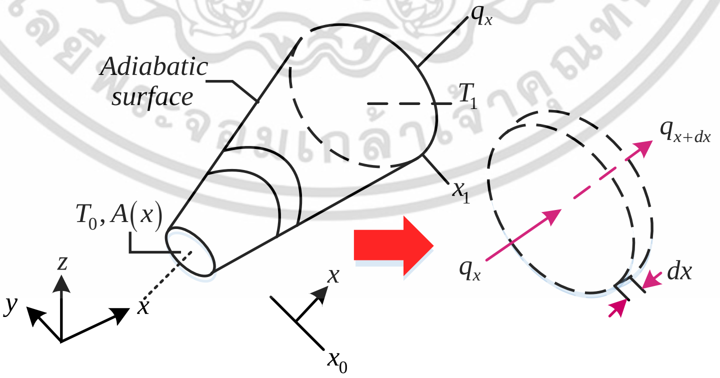
การวิเคราะห์การนำความร้อนที่ผ่านมา เป็นการใช้วิธีมาตรฐาน (Standard approach) นั่นคือ หาการฟุ้งกระจายอุณหภูมิ สมการ (2.26) จากสมการความร้อนแล้วใช้กฎของฟูริเยร์หาการถ่ายเทความร้อนสมการ (2.30) อย่างไรก็ตามยังมีอีกวิธีหนึ่ง ใช้หาค่าดังกล่าวได้ พิจารณาการนำความร้อนในระบบตามรูปที่ 2.11 สำหรับเงื่อนไขที่สภาวะสม่ำเสมอ ไม่มีการผลิตความร้อนภายในระบบ และไม่มีการสูญเสียความร้อนจากด้านข้างเลย อัตราการถ่ายเทความร้อน $q_x = q_{x+dx}$ สำหรับชิ้นส่วนดิฟเฟอร์เรนเชียล dx อันเป็นผลจากกฎทรงพลังงาน และเงื่อนไขนี้ใช้เมื่อพื้นที่ที่แปรเปลี่ยนกับตำแหน่ง $A(x)$ และค่าการนำความร้อนแปรตามอุณหภูมิ $k(T)$ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการกระจายของอุณหภูมิเป็น 2 มิติ โดยแปรเปลี่ยนตาม x และ y แต่เราสามารถสมมุติเป็น 1 มิติตามแกน x ได้โดยให้ผิวด้านข้างเป็นผิวอะเดียแบติก (หุ้มฉนวนทำให้ไม่มีการแปรเปลี่ยนในแกน y)

จากเงื่อนไขข้างต้น เราจะวิเคราะห์การนำความร้อนด้วยกฎของฟูริเยร์ ในกรณีนี้สมการอัตราสามารถอินทิเกรตได้ เนื่องจากอัตราการนำความร้อนคงที่ ถึงแม้ว่าจะไม่ทราบค่าอัตราการนำความร้อนและการกระจายของอุณหภูมิเลย ดังนั้นกฎของฟูริเยร์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอินทิเกรตได้เป็น

$$q_x \int_{x_0}^{x} \frac{dx}{A(x)} = -\int_{T_0}^{T} k(T)\,dT \qquad \text{........(2.39)}$$

ถ้าการอินทิเกรต กระทำจากจุด x_0 ซึ่งมีอุณหภูมิ จะให้สมการของผลลัพท์เป็นฟังก์ชั่น T(x) อย่างไรก็ตามถ้าทราบอุณหภูมิ $T = T_1$ ที่จุด $x = x_1$ แล้ว การอินทิเกรตระหว่าง x_0 และ x_1 จะให้สมการที่สามารถหา q_x ได้ สังเกตว่าถ้าพื้นที่ A มีค่าคงที่ และ k ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ สมการ (2.19) จะลดรูปไปเป็น

$$q_x \frac{\Delta x}{A} = -k\Delta T \qquad \text{........(2.40)}$$



รูปที่ 2.12 ระบบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่

โดยที่ $\Delta x = x_1 - x_0$ และ $\Delta T = T_1 - T_0$ และพึงตระหนักถึงอยู่เสมอว่า การอินทิเกรตสมการอัตรานี้จะใช้ก็ต่อเมื่อเป็น “สภาวะสม่ำเสมอหนึ่งมิติไม่มีการผลิตความร้อนในระบบ” เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

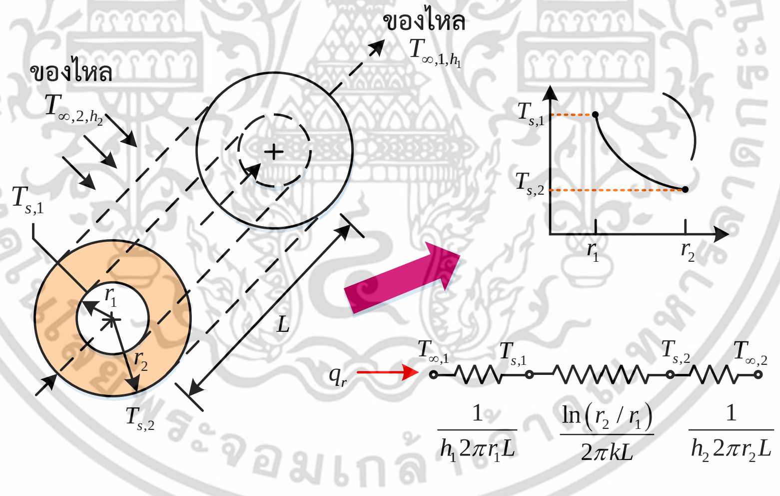
การนำความร้อนในระบบในแนวรัศมี (Radial systems) ของรูปทรงกระบอกจะมีเกร์เดียนต์อุณหภูมิอยู่ในแนวทิศทางรัศมีเท่านั้น จึงสามารถคิดเป็นหนึ่งมิติได้ สมมติว่าระบบของทรงกระบอกกลวงซึ่งผิวภายในและภายนอกสัมผัสกับของไหลที่อุณหภูมิแตกต่างกันแต่อยู่ภายใต้เงื่อนไขสภาวะสม่ำเสมอไม่มีการผลิตความร้อน ระบบนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีมาตรฐานซึ่งเริ่มต้นด้วยสมการความร้อนในรูปที่เหมาะสมหรือวิธีอีกอย่างหนึ่งซึ่งเริ่มต้นด้วยกฎของฟูริเยร์ในรูปที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.12 สำหรับเงื่อนไขดังกล่าว สมการความร้อนทั่วไปจะลดรูปเป็น

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(kr\frac{dT}{dr}\right) = 0 \qquad \text{........(2.41)}$$

สมมุติว่า ค่า $k = const.$ โดยการอินทิเกรต 2 ครั้ง จะได้คำตอบทั่วไปเป็น

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \qquad \text{..... (2.42)}$$

จากสภาวะที่ขอบเขตตามรูป จะได้ว่า $T(r_1) = T_{s,1}$ และ $T(r_2) = T_{s,2}$
แทนเงื่อนไขเหล่านี้ใน (2.42) ให้



รูปที่ 2.13 ทรงกระบอกกลวงมีการพาความร้อนที่ผิวทั้งสอง

$T_{s,1} = C_1 \ln r_1 + C_2$ และ $T_{s,2} = C_1 \ln r_2 + C_2$
แก้สมการหาค่า C_1 และ C_2 แล้วแทนกลับในสมการคำตอบทั่วไป ได้

$$T(r) = \frac{(T_1 - T_2)}{\ln(r_1/r_2)}\ln(r/r_2) + T_2 \qquad \text{........(2.43)}$$

โดยใช้กฎของฟูริเยร์หาอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสมมติว่าไหลตามแนวรัศมีเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_r = -kA\frac{dT}{dr} = -k\left(2\pi L\right)\frac{dT}{dr} \quad \text{........(2.44)}$$

โดยการดิฟเฟอร์เรนชิเอต (2.43) แล้วแทนใน (2.44) จะได้

$$q_r = \frac{2\pi Lk\left(T_{s,1} - T_{s,2}\right)}{\ln\left(r_2 / r_1\right)} \quad \text{........(2.45)}$$

นั่นคือ ค่าความต้านทานความร้อนในกรณีของทรงกระบอกกลวง จะอยู่ในรูป

$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi Lk} \quad \text{........(2.46)}$$

การนำความร้อนสภาวะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady – State Conduction)

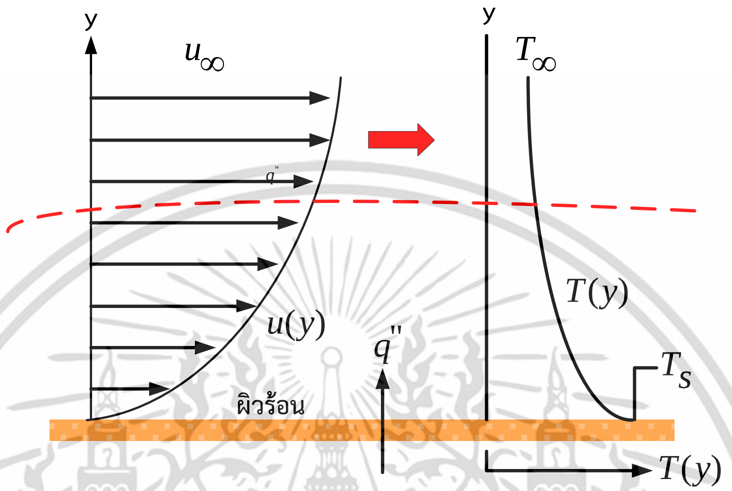
ถ้าอุณหภูมิล้อมรอบวัตถุแข็งเปลี่ยนอย่างทันทีทันใดแล้ว อุณหภูมิในเนื้อวัตถุนั้นจะเริ่มเปลี่ยนตามเพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุลสม่ำเสมอ ในการนี้จะต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งก่อนจะเข้าสู่สภาวะสม่ำเสมอ ซึ่งช่วงนี้จะเรียกว่า สภาวะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady-state) หรือสภาวะชั่วขณะ (Transient) การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิภายในวัตถุระหว่างช่วงสภาวะไม่สม่ำเสมอค่อนข้างยุ่งยากมาก เนื่องจากอุณหภูมิแปรเปลี่ยนตามตำแหน่งและเวลาตลอด ในการวิเคราะห์ทางปฏิบัติเป็นจำนวนมาก การแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิกับตำแหน่งถูกละเลยไม่นำมาคิดในช่วงสภาวะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาเท่านั้น ซึ่งการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ระบบความร้อนที่เป็นกลุ่มก้อน (Lumped system analysis) อย่างเช่น ลูกกลมโลหะร้อนซึ่งถูกนำออกจากเตาเผาแล้ววางไว้ในกระแสอากาศพลังงานจะถูกถ่ายเทออกไปโดยการพาและการแผ่รังสีจากผิวของมันสู่สิ่งแวดล้อม การถ่ายเทพลังงานโดยการนำเกิดขึ้นจากภายในของลูกกลมโลหะสู่ผิวของมันและอุณหภูมิในแต่ละจุดในลูกกลมนี้ลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสม่ำเสมอหรือมีค่าเท่ากันหมดที่เวลาใดๆ (นั่นคือ $\frac{dT}{dx} = \frac{dT}{dy} = \frac{dT}{dz} = 0$)

2.4.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับผิวของของแข็ง กลไกการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำให้ของไหลไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อนแบบบังคับ” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่งมีผลมาจากแรงลอยตัวซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ หรือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ เช่น ปล่อยแผ่นวัสดุร้อนที่วางอยู่ในแนวดิ่งไว้ในอากาศเย็นที่หยุดนิ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของแผ่นวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะเกรเดียนต์อุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้เกรเดียนต์ของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามอุณหภูมิในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรม เพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน T_s และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ $T(y)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การพัฒนาชั้นของขอบเขตในการพาความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ถูกกำหนดเป็น

$$q'' = h[T_s - T(y)] \quad \text{........(2.47a)}$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังร้อนไปยังของไหลที่เย็น (มีหน่วยเป็น W/m^2) ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากของไหลที่ร้อน ไปยังผนังเย็น จะได้ว่า

$$q'' = h[T(y) - T_s] \quad \text{........(2.47b)}$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังที่เย็น สมการ (2.47a) เป็นสมการที่ได้มาจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton’s law of Cooling) โดยที่อุณหภูมิมีหน่วยเป็นเซลเซียสหรือเคลวิน และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h มีหน่วยเป็น W/(m^2.$^\circ$C)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convective heat transfer coefficient or film convective coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล (เช่น ลามินาร์ หรือ เทอร์บูเลนท์) รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ของไหลไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล อุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่างๆ บนพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับกลไกของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (การเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากการปั๊มหรือพัดลม) ค่าของ h จะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นผิววัตถุ ดังนั้นในทางวิศวกรรมแล้ว เพื่อความสะดวกจะใช้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

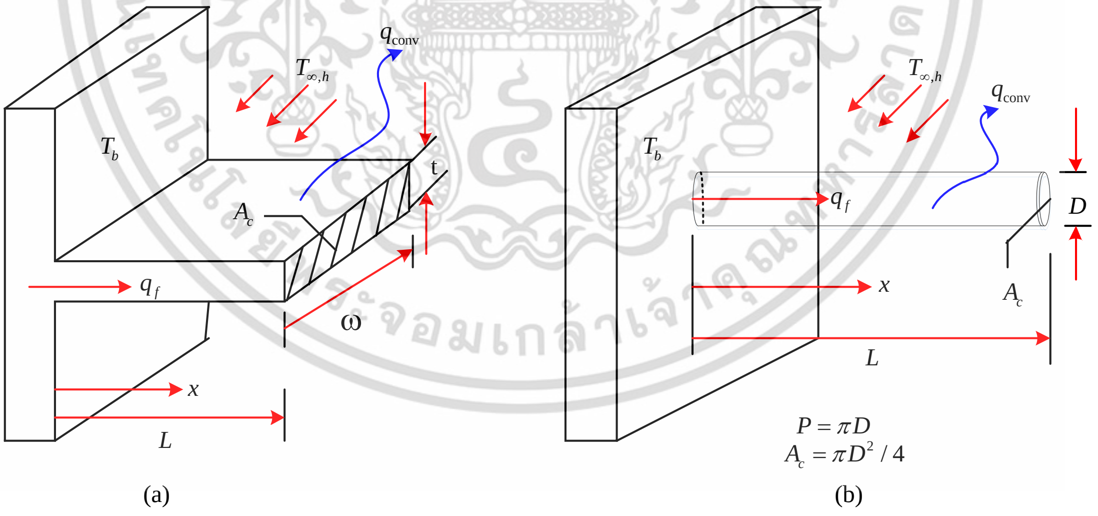
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดพื้นผิว (h_m) แทนค่า h ที่ตำแหน่งนั้นๆ ในการพิจารณาการพาความร้อนตลอดทั้งพื้นผิว สมการ (2.47a) และ (2.47b) ค่า h จึงถูกแทนค่าด้วย h_m ดังนั้นค่า q'' จึงเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยตลอดบริเวณที่พิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาการไหลผ่านวัตถุซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตง่ายๆ เช่น แผ่นเรียบ หรือ การไหลภายในท่อทรงกระบอก สำหรับการไหลผ่านวัตถุที่มีรูปทรงสลับซับซ้อน ค่า h สามารถหาได้จากวิธีการทดลอง ซึ่งค่าที่ได้จะมีช่วงของความแตกต่างกันกว้างมากตามแต่ละรูปแบบ

2.4.3 การถ่ายเทความร้อนจากครีบ (Heat transfer from fins)

การติดครีบดังรูปที่ 2.15 เป็นวิธีการอย่างหนึ่งในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นผิวโดยอาจพิจารณาได้ง่ายๆ จากสมการของการพาความร้อน

$$q_f = hA_c\left(T_b - T_{\infty,h}\right) \qquad \text{........(2.48)}$$

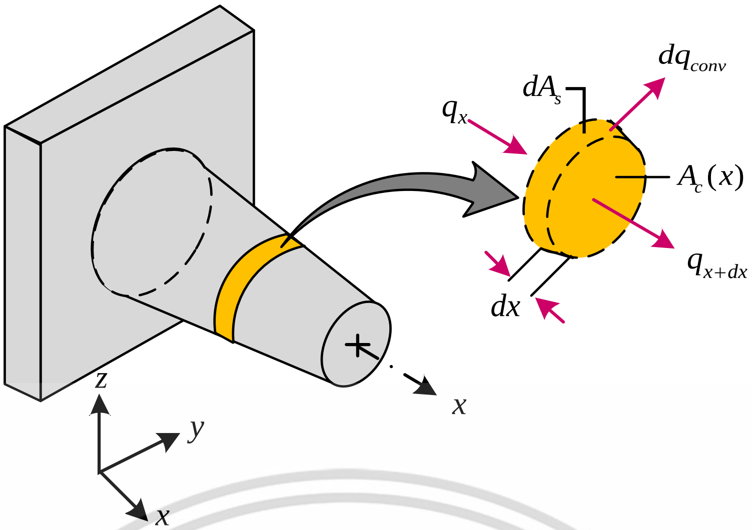
เมื่อต้องการเพิ่มค่า q_f ให้มากขึ้น โดยที่ค่า h, T_s และ T_∞ ยังคงเดิม ก็จะทำได้โดยการเพิ่มค่า A_c ซึ่งจะเพิ่มขึ้นได้โดยการติดครีบเข้ากับพื้นที่ผิวเป็นผลให้ค่า A_c เพิ่มขึ้น โดยปกติจะใช้ครีบเมื่อผิวหนึ่งของวัสดุสัมผัสกับของไหลที่ค่า h สูง แต่อีกด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลที่มีค่า h ต่ำ จึงติดครีบเข้ากับด้านที่มีค่า h ต่ำ เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น เช่น ครีบที่ติดกับหม้อน้ำรถยนต์ (ด้านที่สัมผัสกับอากาศ) และครีบที่ติดอยู่ด้านนอกของเครื่องยนต์ระบายความร้อนด้วยอากาศ เป็นต้น



รูปที่ 2.15 การถ่ายเทความร้อนจากครีบจากการพาความร้อน

อุณหภูมิที่โคนของครีบจะถือว่าเท่ากับอุณหภูมิของพื้นผิว (T_b) ที่ติดครีบอยู่ แต่อุณหภูมิตามความยาวของครีบจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนออกไปจากครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การถ่ายเทความร้อนออกไปจากครีบโดยการพิจารณาชิ้นส่วนเล็กๆ ของครีบ

โดยการประยุกต์กฎการอนุรักษ์พลังงาน กับชิ้นส่วนเล็กๆของรูปที่ 2.16 จะได้

$$q_x = q_{x+dx} + dq_{\text{conv}} \qquad \text{........(2.49)}$$

แทนค่า
$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx}dx$$

จัดเทอมใหม่ได้

$$\frac{dq}{dx}dx + dq_{conv} = 0$$

$$\frac{dq_x}{dx} + h\frac{dA_s}{dx}(T - T_\infty) = 0$$

$$\frac{d}{dx}\left(A_c\frac{dT}{dx}\right) - \frac{h}{k}\frac{dA_s}{dx}(T - T_\infty) = 0$$

หรือ
$$\frac{d^2T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c}\frac{dA_c}{dx}\right)\frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c}\frac{h}{k}\frac{dA_s}{dx}\right)(T - T_\infty) = 0 \qquad \text{..... (2.50)}$$

สมการ (2.50) เป็นรูปทั่วไปของสมการพลังงานหนึ่งมิติของครีบ ซึ่งให้เงื่อนไขขอบที่เหมาะสมแล้วจะได้คำตอบทั่วไปของการกระจายอุณหภูมิ ซึ่งเมื่อใช้กฎของฟูริเยร์ ก็จะสามารถหาอัตราการนำความร้อน ณ จุดใดๆในครีบได้ พิจารณาครีบที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอ (Fins of uniform cross – sectional area) เริ่มต้นด้วยกรณีที่ง่ายที่สุดของครีบตรงและแท่งกลม หน้าตัดสม่ำเสมอ (พื้นที่หน้าตัดคงที่ตามแกน x) ครีบแต่ละอันจะติดที่ผิวฐานอุณหภูมิ $T_0 = T_b$ และยื่นของไหลผ่านอุณหภูมิ T ครีบกรณีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A_c คงที่ และ $A_s = Px$ โดยที่ A_s เป็นพื้นที่ผิววัดจากฐานถึง x และ P คือเส้นรอบรูปหน้าตัดของครีบ ดังนั้นจะได้ $\frac{dA_c}{dx} = 0$ และ $\frac{dA_s}{dx} = P$ เพราะฉะนั้น (2.50) ลดรูปได้

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_c}\left(T - T_\infty\right) = 0 \qquad ..... (2.51)$$

เพื่อให้ง่าย เราแปลงรูปไปอยู่ในตัวแปรใหม่ $\theta = T - T_\infty$ ดังนั้น

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{d^2\theta}{dx^2}$$

จะได้สมการเป็น

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \qquad ..... (2.52)$$

โดยที่

$$m^2 \equiv \frac{hP}{kA_c}$$

สมการ (2.52) มีคำตอบทั่วไป คือ

$$\theta(x) = C_1e^{mx} + C_2e^{-mx} \qquad ..... (2.53)$$

เพื่อหาค่าคงที่ C_1 และ C_2 จำเป็นต้องทราบเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม เงื่อนไขหนึ่งนั้นมักใช้เงื่อนไขที่โคนครีบ ($x = 0$)และอีกเงื่อนไขหนึ่งจะใช้ที่ปลายครีบ ($x = L$) นั่นคือ

1. $\theta(0) = T_b - T_\infty$ ที่ $x = 0$
2. ที่ $x = L$ จะแยกพิจารณาเป็น 4 กรณี ดังนี้

    ก. ครีบยาวมาก $(L \to \infty)$ ข. ปลายครีบมีการพาความร้อน

    ค. ปลายครีบถูกหุ้มฉนวนไว้ ง. กำหนดอุณหภูมิครีบที่ปลาย

2.4.4 การไหลแบบลามินาร์และเทอร์บูเลนท์ (Laminar and Turbulent Flow)

ขั้นแรกที่สำคัญในการแก้ปัญหาทางการพา ก็คือ การหาค่าบาวน์ดารีเลเยอร์เป็นแบบลามินาร์หรือเทอร์บูเลนท์ ส่วนความเสียดทานของผิว และอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับสภาวะที่มีอยู่จริงเหล่านี้ สำหรับการไหลของของไหลผ่านแผ่นแบนเรียบถ้าแผ่นแบนเรียบนั้นยาวมากจะเกิดบาวน์ดารีเลเยอร์ขึ้นทั้งแบบลามินาร์และเทอร์บูเลนท์ โดยลามินาร์บาวน์ดารีเลเยอร์จะเกิดขึ้นก่อน เมื่อค่า x เพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงการเปลี่ยนแปลง (Transition) แล้วจึงจะเข้าสู่ช่วงเทอร์บูเลนท์เมื่อเพิ่มค่า x ขึ้นเรื่อยๆดังแสดงในรูปที่ 2.16 ส่วนค่า h จะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ในการคำนวณหาพฤติกรรมของบาวน์ดารีเลเยอร์นั้นเราสมมุติว่าช่วง Transition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

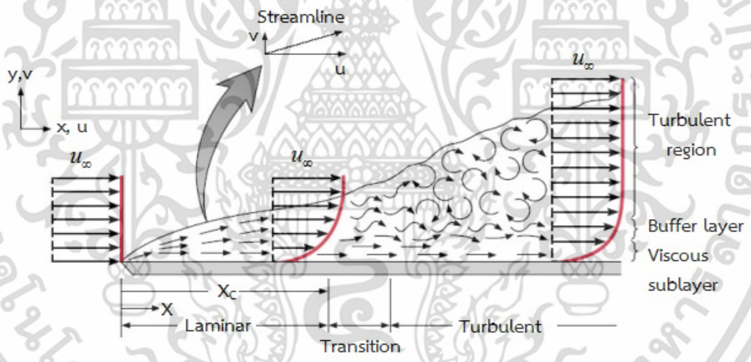
เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง x_c ตำแหน่งนี้หาได้จากกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า เรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re)

$$Re_x \equiv \frac{\rho u_\infty x}{\mu} \qquad \text{........(2.59)}$$

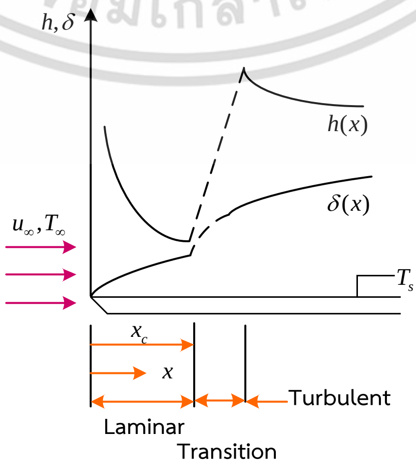
โดยที่ค่า x ปีนระยะทางจากขอบด้านหน้า ค่าเรโนลด์นัมเบอร์วิกฤต (Critical Reynolds number) เป็นค่าของ Re_x ที่ซึ่งเกิด Transition ขึ้น และสำหรับการไหลภายนอกวัตถุจะมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 10^5 ถึง 3 x 10^6 ซึ่งขึ้นอยู่กับความหยาบของพื้นผิว ระดับความปั่นป่วน (Turbulence) ของกระแสของไหลอิสระ และธรรมชาติของการแปรเปลี่ยนความดันตามพื้นผิว ตามปกติจะถือว่าค่า Re_x ประมาณ

$$Re_{x,c} = \frac{\rho u_\infty x_c}{\mu} = 5\times10^5 \qquad \text{.......(2.60)}$$

ถ้าไม่ระบุไว้ให้ใช้ค่านี้ สำหรับการคำนวณหาช่วงเกิด Transition ในเทอร์บูเลนท์บาวน์ดารีเลเยอร์ช่วงใกล้พื้นผิวจะมีชั้นบางๆมากเรียกว่า Sub layer ของความหนืด เป็นที่ซึ่งการไหลยังคงคุณสมบัติการไหลหนืดของมันไว้ถัดจากชั้นนี้ขึ้นไปเป็นบริเวณที่เรียกว่า Buffer layer ซึ่งเป็นช่วงที่มีความปั่นป่วนไม่มากนัก และค่าความเร็วเฉลี่ยตามแกนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับระยะทางจากพื้นผิว ถัดจากชั้นนี้ไปอีกจะเป็น Turbulent region ซึ่งมีความปั่นป่วนสูงมากและความเร็วตามแกนจะเปลี่ยนไม่มากนัก



รูปที่ 2.17 การเกิดบาวน์ดารีเลเยอร์ของความเร็วบนแผ่นแบนเรียบ



รูปที่ 2.18 การแปรเปลี่ยนของ δ และ h สำหรับการไหลผ่านแผ่นแบนเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังแบบคู่ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ การออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์และการจำลองการไหลของอากาศร้อนภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ มีขั้นตอนดำเนินงานดั้งนี้

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

3.2 ทดสอบการทำงานและหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

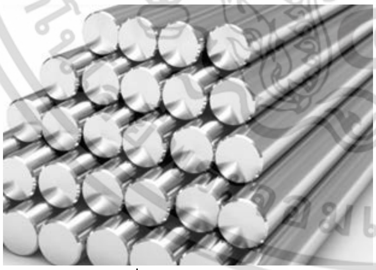
3.3 การศึกษาและออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

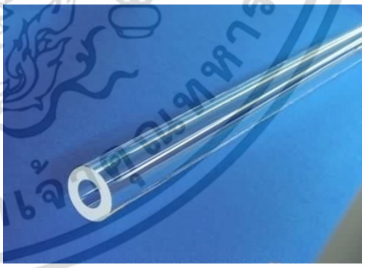
3.4 การจำลองการหาค่าอุณหภูมิและความดัน ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในขณะที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

3.1.1 การเลือกวัสดุในการใช้สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ทางความร้อนดังนั้นวัสดุที่เลือกใช้ต้องเหมาะสมกับการทำงานของตัวเครื่องยนต์ในแต่ละชิ้นส่วนที่สำคัญ ซึ่งในการออกแบบและสร้างนี้จะเลือกคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุศาสตร์ ดังรูปที่ 3.1 - รูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.1


รูปที่ 3.1 สแตนเลส


รูปที่ 3.2 แก้ว

รูปที่ 3.3 ทองเหลือง

รูปที่ 3.4 อะลูมิเนียม

รูปที่ 3.5 ไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุศาสตร์

วัสดุ	ความจุความร้อน C_p (J/kg.K)	ส.ป.ส การขยายตัวเชิงเส้น α [(K)-1x10^{-6}]	ค่าสภาพการนำความร้อน k (W/m.K)	จุดหลอมเหลว (K)
แก้ว	840	282	1.7	1488
สแตนเลส	502	289	15.9	1723-1811
ทองเหลือง	375	293	120	1143 –1140
อะลูมิเนียม	900	23	237	934
ไม้	0.4	271	0.1-0.35	1700

3.1.2 การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้โปรแกรม SolidWorks ในการออกแบบทุกชิ้นส่วน ดังตารางที่ 3.2 และดังรูปที่ 3.6 - 3.15

พารามิเตอร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ (Parameters) ของเครื่องยนต์

Parameters	Values/Types				
1. Working fluid	Air				
2. Phase angle φ	90°				
3. Flywheel	Flywheel				
3.1 Material	Brass				
3.2 Diameter (mm)	85				
4. Displacer	Cylinder	Piston	5. Power	Cylinder	Piston
4.1 Materials	Brass	Glass	5.1 Material	Brass	Glass
4.2 Stoke y_o (mm)		18	5.2 Stoke y_p (mm)		18
4.3 Swept volume V_{SD} (mm^3)		8835.72	5.3 Swept volume V_{SP} (mm^3)		3180.86
6. Dead volume V_{DE} (mm^3)	5890.48				
7. Compression ratio ξ	2.41				

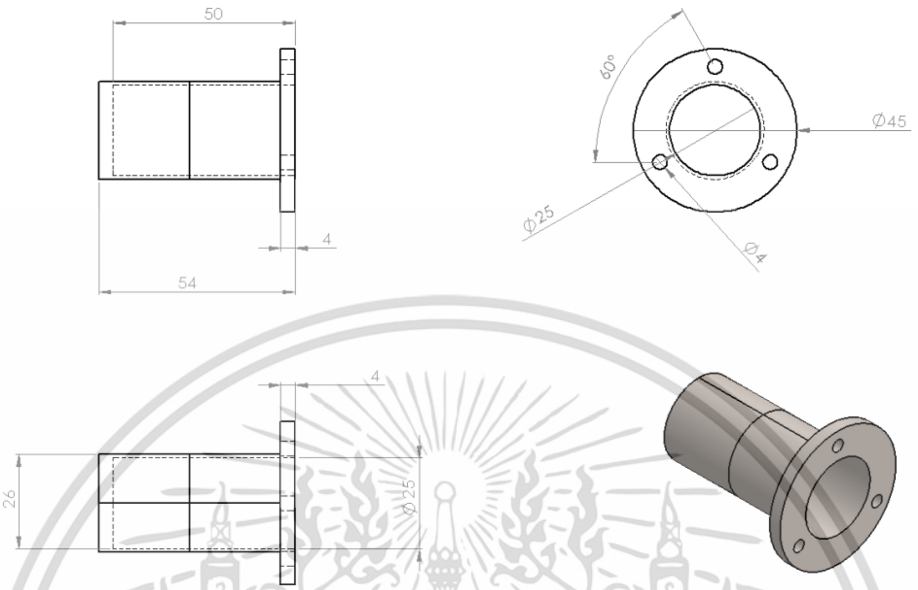
การออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks

จากตารางที่ 3.2 ใช้โปรแกรมในการเขียนแบบชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่สำคัญดังนี้ HEAT RECEIVE, HEAT SINK OF DISPLACER, PISTON POWER, HEAT SINK OF POWER, FLYWHEEL, PISTON DISPLACER, BASE, STROKE ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) HEAT RECEIVE

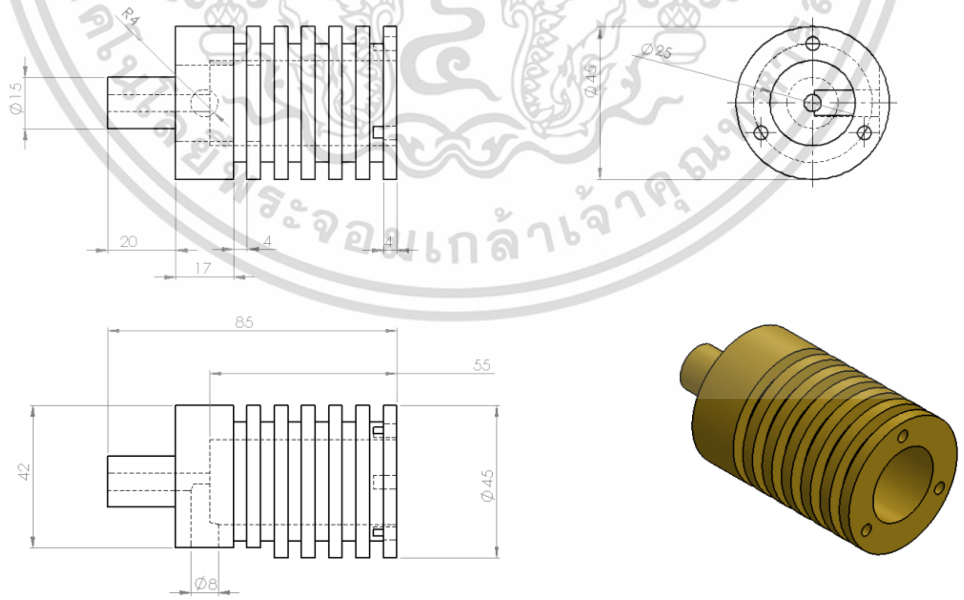
Material: Stainless steel



รูปที่ 3.6 ตัวรับความร้อน

2) HEAT SINK

Material: Brass

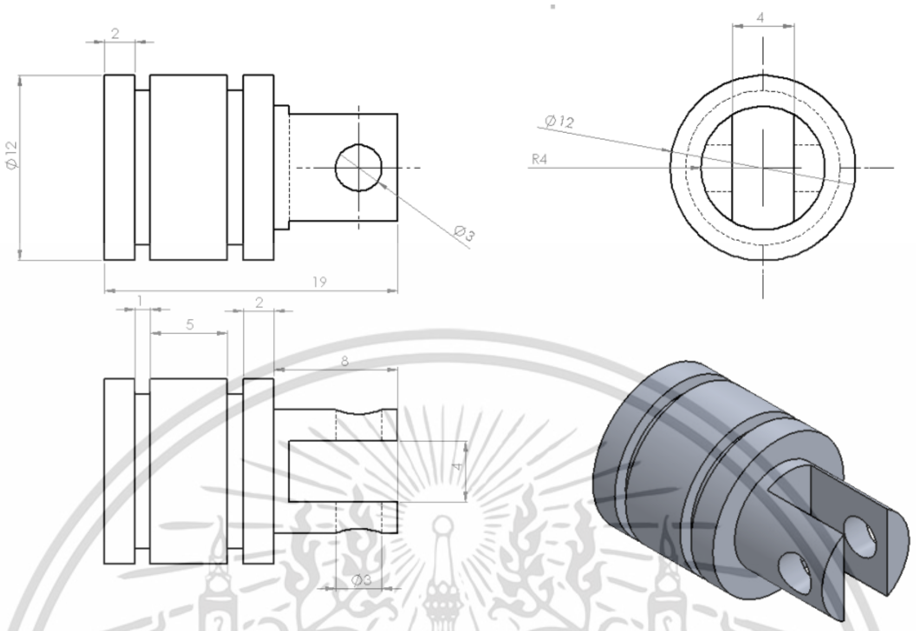


รูปที่ 3.7 ฮีตซิงก์ฝั่งกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) PISTON POWER

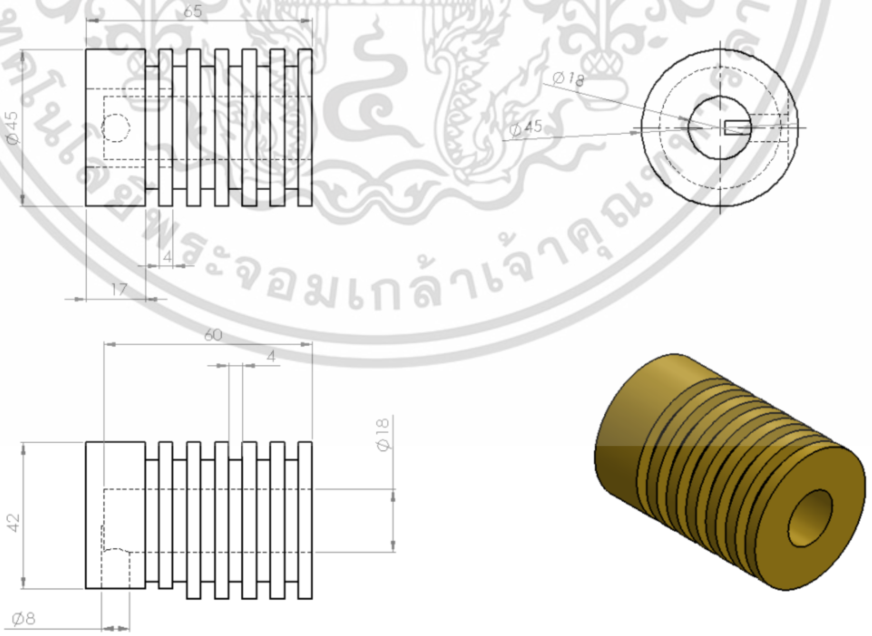
Material: Aluminum



รูปที่ 3.8 ลูกสูบกำลัง

4) HEAT SINK

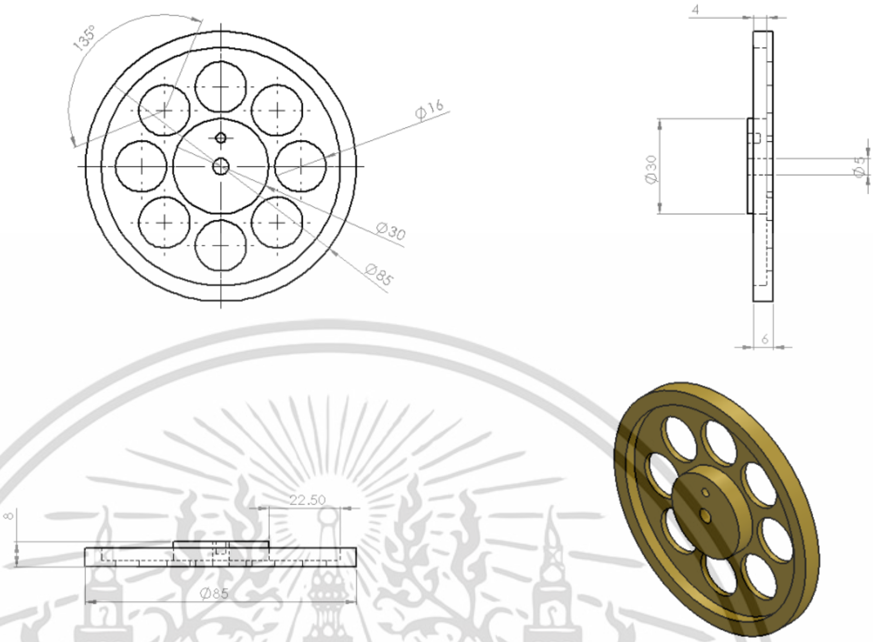
Material: Brass



รูปที่ 3.9 ฮีตซิงก์ฝั่งกระบอกสูบกำลัง

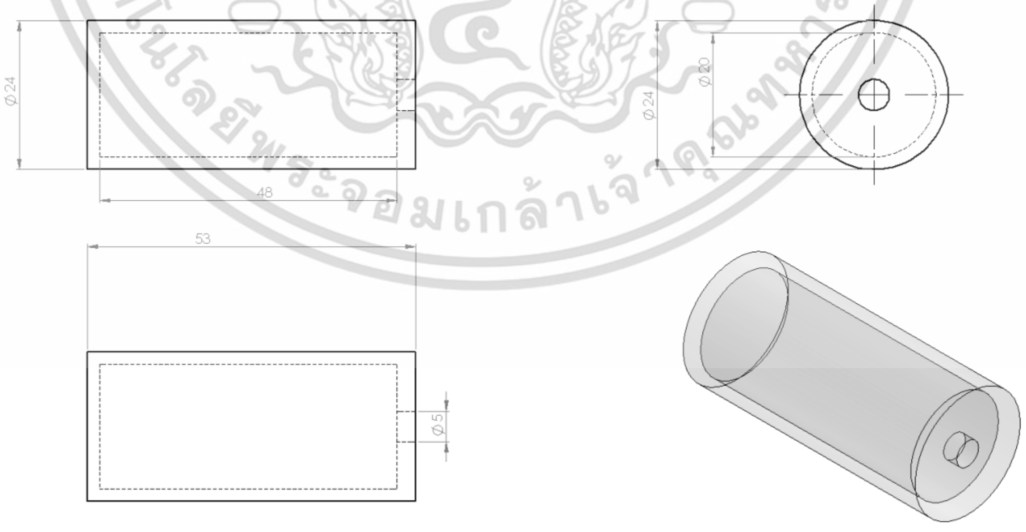
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) FLYWHEEL
Material: Brass



รูปที่ 3.10 ล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง

6) PISTON DISPLACER
Material: Glass

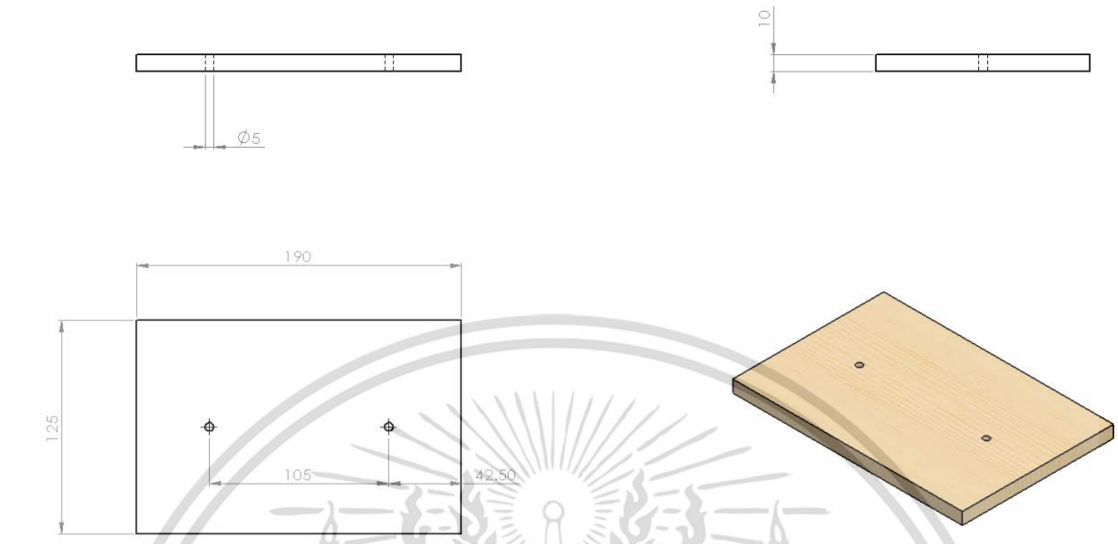


รูปที่ 3.11 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) BASE

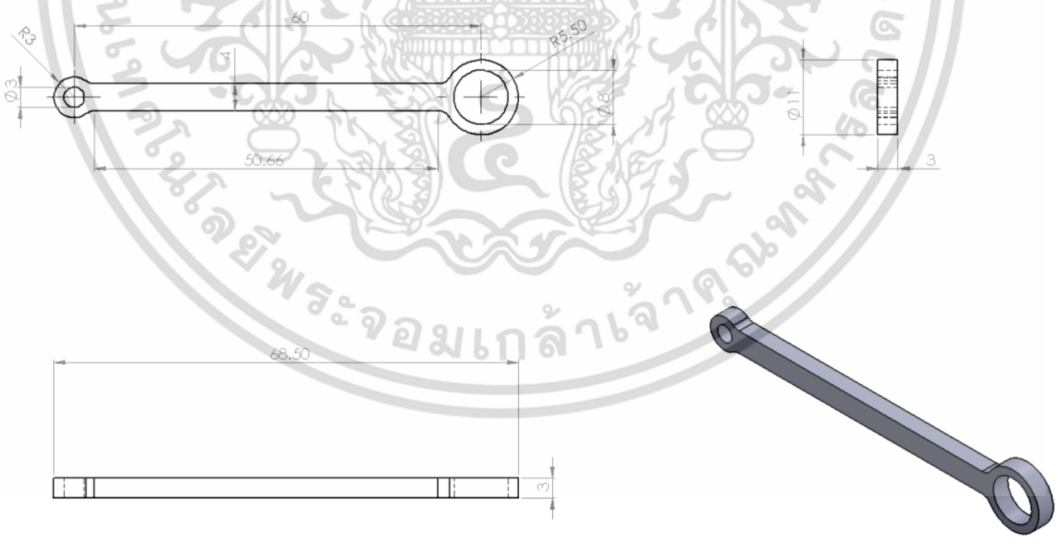
Material: Wood



รูปที่ 3.12 ฐานรองสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

8) STROKE

Material: Aluminum



รูปที่ 3.13 ก้านชักของทั้งสองลูกสูบ

เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์

1) เครื่องมือวัด (Vernier Calliper (Mitutoyo))

ใช้สำหรับการวัดขนาดชิ้นงานในย่านความละเอียดมิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 Vernier Calliper (Mitutoyo)

2) เครื่องกลึง (Lathe Machine)

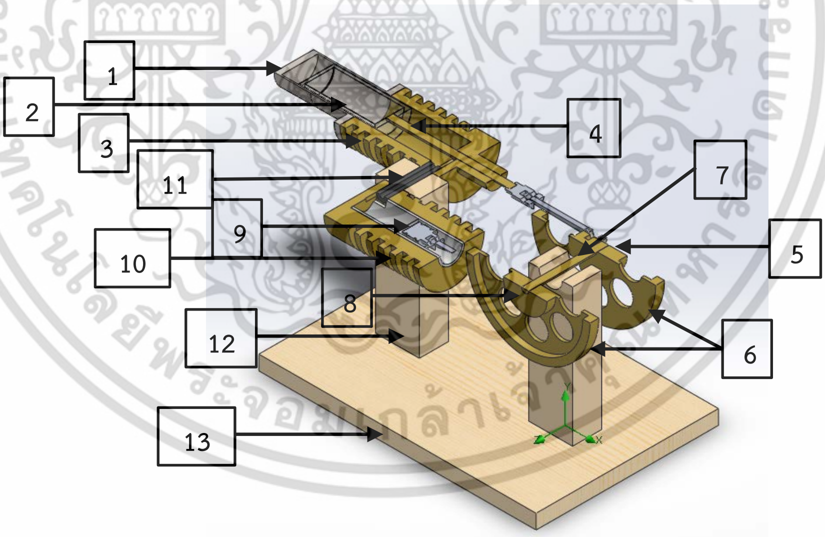
ใช้สำหรับการขึ้นรูปโลหะที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก

3) เครื่องเจาะ (Metal Drill)

ใช้สำหรับการเจาะรู้บนชิ้นงาน

4) เครื่องกัดโลหะ (Milling Machine)

ใช้สำหรับขึ้นรูปโลหะที่มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม



รูปที่ 3.15 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่

1. ฮีตเตอร์ 2. ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ 3. ฮีตซิงค์กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์
4. แกนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ 5. ข้อเหวี่ยงลูกสูบดิสเพลสเซอร์
6. ล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่ 7. แกนรองรับล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง
8. ข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง 9. ลูกสูบกำลัง
10. ฮีตซิงค์กระบอกสูบกำลัง 11. ท่อส่งอากาศ
12. ฐานรองกระบอกสูบ 13. ฐานยึดจับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ทดสอบการทำงานและหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

การทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์ที่ออกแบบและสร้างเป็นการทดสอบวัดอุณหภูมิ (T_1,T_2,T_3,T_4 และ T_5) ทั้ง 5 จุดที่กระบอกสูบร้อนและกระบอกสูบเย็น และวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ คือ ความดัน ปริมาตร กำลัง ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ และใช้เป็นเงื่อนไขอุณหภูมิอ้างอิงของเครื่องยนต์ขณะทำงานในการ Flow simulation ของเครื่องยนต์ในขณะที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์เป็นชิ้นส่วนประกอบ

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) ตะเกียงแอลกอฮอล์

ใช้สำหรับให้ความร้อนกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

รูปที่ 3.16 ตะเกียงแอลกอฮอล์

2) เครื่องวัดอุณหภูมิ

ใช้สำหรับแสดงและบันทึกค่าอุณหภูมิของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

รูปที่ 3.17 FLUKE 54 II B Thermometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) หัววัดอุณหภูมิ

ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

A. FLUKE 80PK-25 (304 Stainless steel) 1 m
(ย่านการวัด 0 - 1500°C)

B. FLUKE 80PK-1 (K Type) 1 m
(ย่านการวัด 0 – 200°C)

รูปที่ 3.18 หัววัดอุณหภูมิ

4) เครื่องวัดความเร็วรอบ

ใช้สำหรับวัดความเร็วของล้อเกียร์กระตุ้นกำลัง

รูปที่ 3.19 Digital tachometer (Rang 10 to 99,999 RPM)

5) โปรแกรม SolidWorks

ใช้สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและจำลองการไหลของความร้อน

รูปที่ 3.20 โปรแกรม SolidWorks 2015

3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1) ให้ความร้อนกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ตัวรับความร้อนของกระบอกสูบร้อนโดยใช้ตะเกียงแอลกอฮอล์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน

2) ทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_1, T_2, T_3, และ T_4 และจับเวลาไปพร้อมกัน

3) ทำการวัดความเร็วของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขณะเริ่มทำงาน

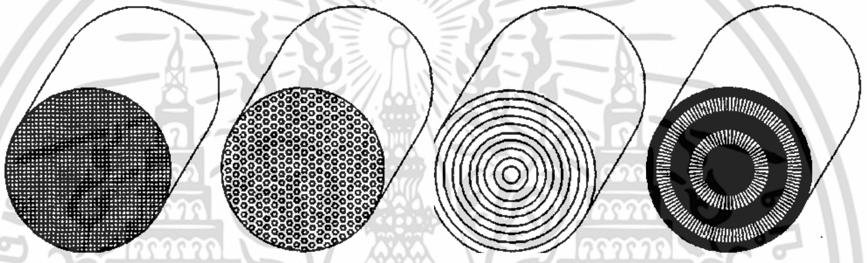
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาและออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยโปรแกรม SolidWorks

3.3.1 วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์

รีเจนเนอเรเตอร์แบบสถิตไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ นอกจากชิ้นส่วนเล็กๆ ที่ใช้ในอุปกรณ์สลับการไหล การใช้งานส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องจัดให้เมทริกซ์สองชุดพร้อมทั้งให้มีการสลับ การไหลเป็นจังหวะ ในขณะใดๆ เมทริกซ์ชุดหนึ่งจะรับของไหลร้อนและอีกชุดหนึ่งจะรับของไหลเย็น รีเจนเนอเรเตอร์ประกอบด้วยโครงสร้างเมทริกซ์ (Matrix) ของมวลที่โปร่งพรุนมีช่องว่างแทรกอยู่ทั่วไป เช่น เส้นลวด ลูกกลม แป้งฝุ่น เป็นต้น เพื่อให้ของไหลร้อนและของไหลเย็นไหลผ่านตัวมันไปสลับกัน ดังรูปที่ 3.22

วัสดุเมทริกซ์เป็นวัสดุที่ใช้ในการทำเมทริกซ์ของรีเจนเนอเรเตอร์อาจเป็นวัสดุที่มีความจุความร้อนจำเพาะที่สูง และสามารถทำให้อยู่ในรูปที่ให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนรวมมาก สำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับวัสดุเมทริกซ์ ลักษณะสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของวัสดุเมทริกซ์ก็คือ สภาพนำความร้อน ในทางอุดมคติ



(a) (b) (c) (d)

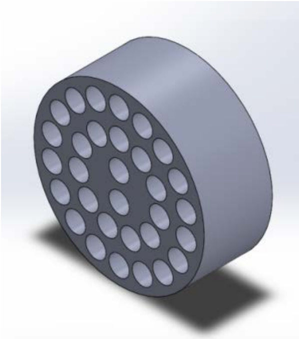
รูปที่ 3.21 โครงสร้างเมทริกซ์รีเจนเนอเรเตอร์

a) Screens
b) Balls
c) Foils
d) Composite

3.3.2 ออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยโปรแกรม SolidWorks

การออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์เลือกวัสดุเป็นสแตนเลส มี 3 แบบ ดังรูปที่ 3.23 – รูปที่ 3.25

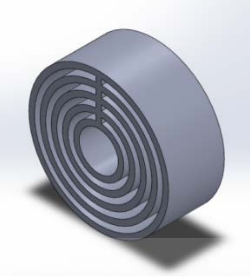
1) รีเจนเนอเรเตอร์แบบที่ 1



รูปที่ 3.22 รีเจนเนอเรเตอร์ลักษณะ Balls ที่มีรูเป็นวงกลม

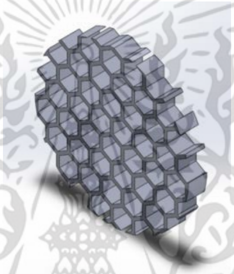
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) รีเจนเนอเรเตอร์ แบบที่ 2



รูปที่ 3.23 รีเจนเนอเรเตอร์ลักษณะ Foils

3) รีเจนเนอเรเตอร์ แบบที่ 3

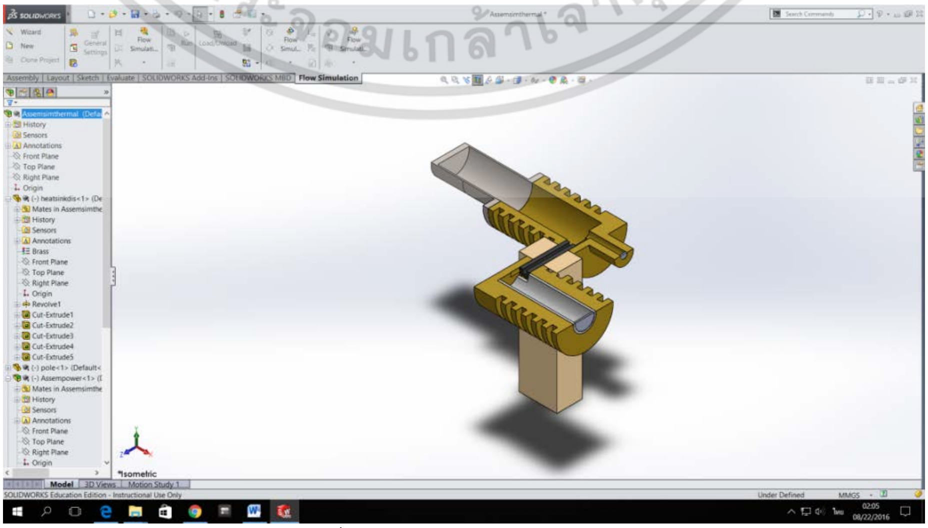


รูปที่ 3.24 รีเจนเนอเรเตอร์ลักษณะ Balls ที่มีรูเป็นหกเหลี่ยม

3.4 การจำลองการหาค่าอุณหภูมิและความดัน ด้วยวิธี Flow simulation ของโปรแกรม SolidWorks ในขณะที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

3.4.1 การศึกษาการใช้งานเพื่อจำลองการหาอุณหภูมิและความดันด้วยวิธี Flow simulation

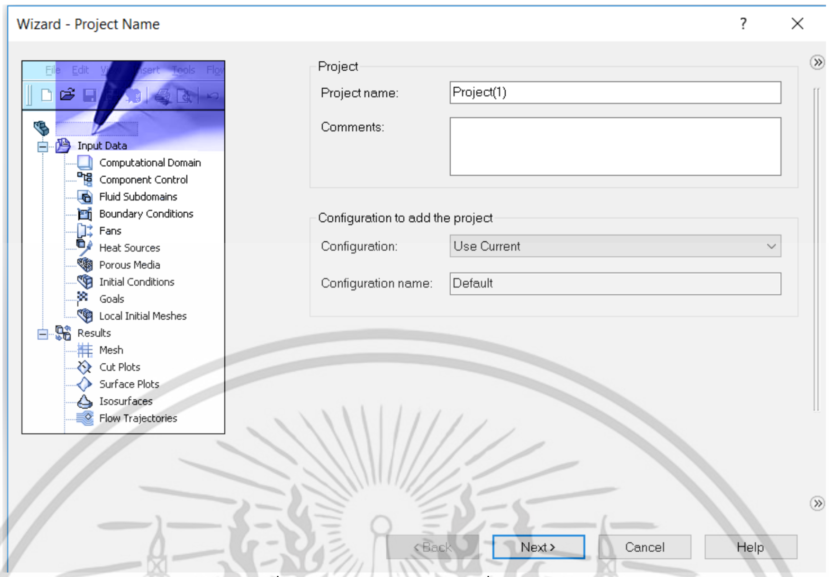
1) เปิดโปรแกรม SolidWorks แล้วไปที่ Flow Simulation ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 Flow Simulation

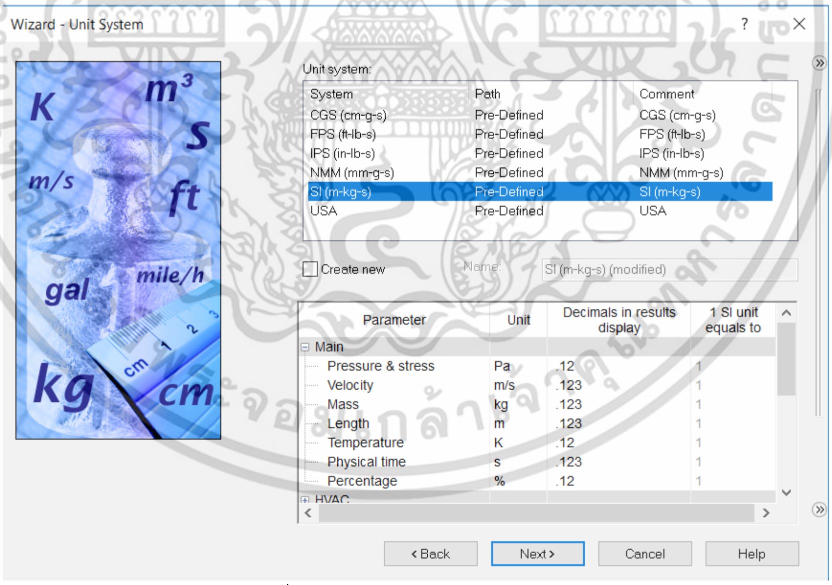
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) จากนั้นไปที่คำสั่ง Wizard เพื่อเป็นการกำหนดเงื่อนไขการ Simulation แสดงให้เห็นดัง รูปที่ 3.26 ให้เรากดไปที่ Next



รูปที่ 3.26 หน้าต่างคำสั่ง Wizard

3) รูปที่ 3.27 ให้เราเลือกหน่วยมาตรฐานว่าจะใช้หน่วยของระบบไหน ในตัวอย่างเลือก SI



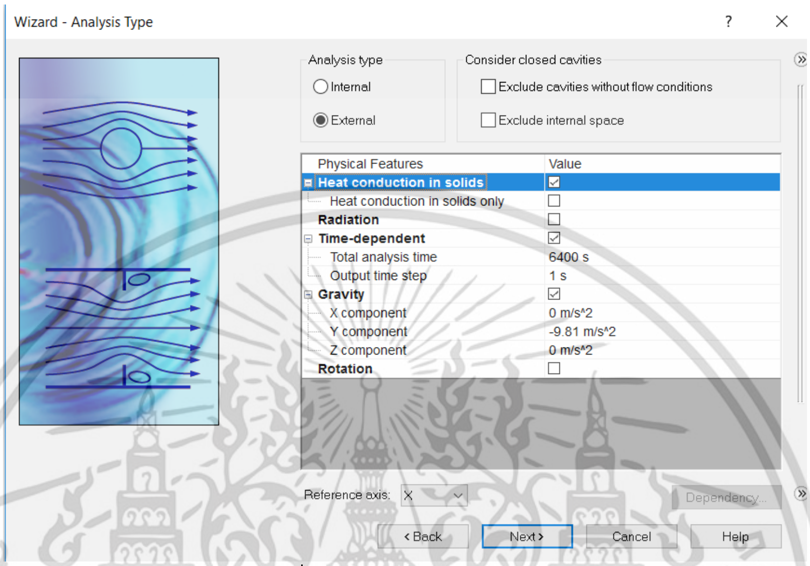
รูปที่ 3.27 เลือก Unit system

4) รูปที่ 3.28

- Internal ใช้แบบการไหลภายในเท่านั้น
- External เป็นการไหลจากภายนอก
- Exclude เมื่อเลือกหมายความว่าเราจะไม่คำนวณในส่วนนั้นแต่เนื่องจากในงานของเราคำนวณทั้งภายนอกและในจึงไม่ต้องคลิกเลือก

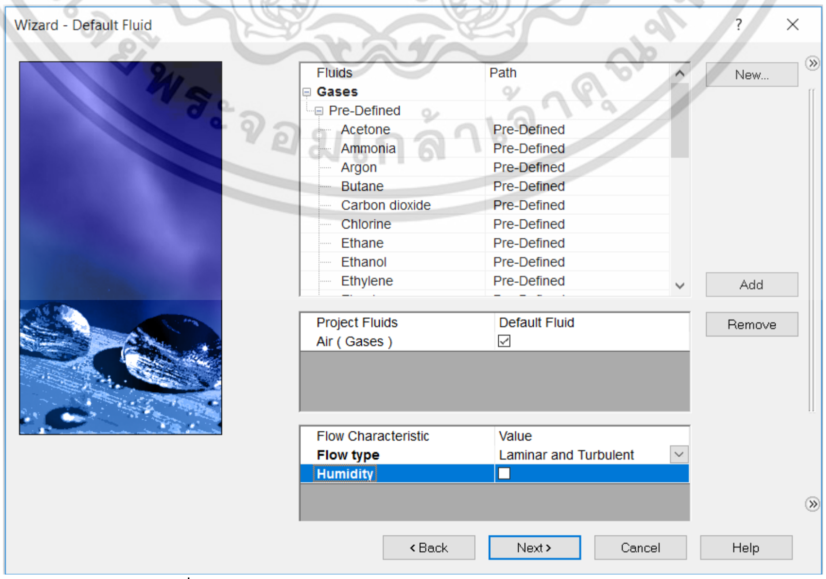
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Time-dependent คือ เกี่ยวข้องกับเวลา
    - Total analysis time คือ เวลาทั้งหมดที่คำนวณ
    - Output time step คือ ให้แสดงผลที่ช่วงเวลาเท่าไหร่ ในงานนี้ให้แสดงทุก 1 วินาที
- Gravity คือ เอาแรงโน้มถ่วงเข้ามาคิด และแกน Y บอกทิศทางของแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 3.28 เลือกการทำงาน

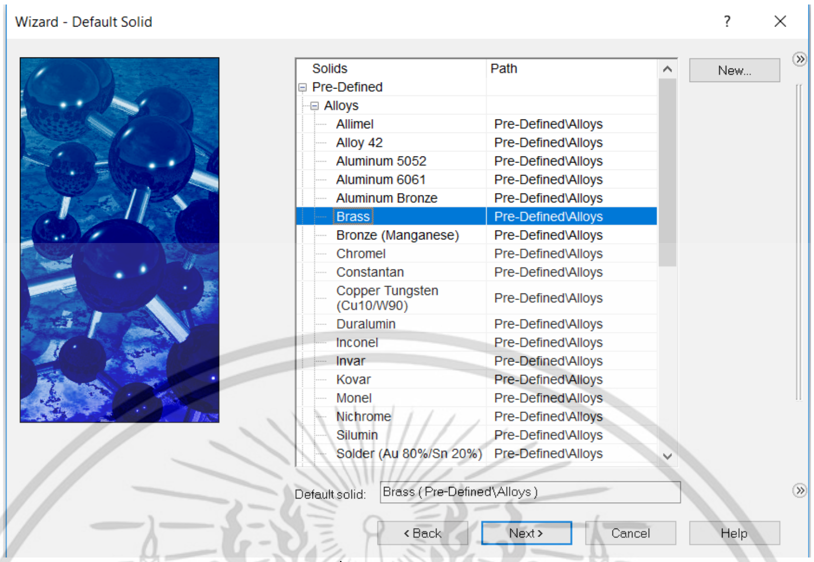
5) รูปที่ 3.29
- Project Fluid คือ ของไหลที่ใช้ในงานที่เราเลือกอากาศ
- Flow type คือ แบบของการไหล เลือกLaminar และ Turbulent เพราะเป็นการไหลทั้ง 2 อย่าง



รูปที่ 3.29 เลือกของไหลและประเภทของการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เป็นการเลือกของแข็งในงาน Simulation เราได้เลือกทองเหลืองซึ่งเป็นวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง แสดงดังรูปที่ 3.30

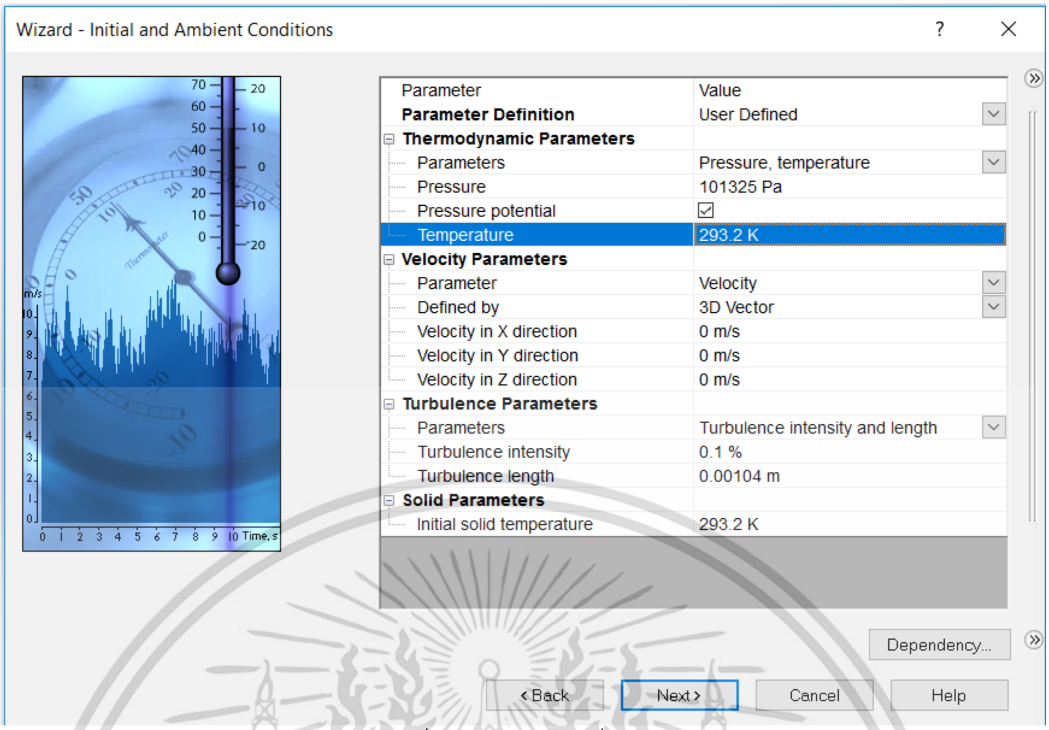


รูปที่ 3.30 เลือกวัสดุ

7) รูปที่ 3.31 เป็นการตั้งเงื่อนไขเริ่มต้นของโปรแกรม ทั้งอุณหภูมิ ความดัน อุณหภูมิของของแข็งและก๊าซ

- Thermodynamic Parameter คือ การกำหนดตัวแปรของของไหล
  Pressure คือ ความดันเริ่มต้น
  Temperature คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (อุณหภูมิห้อง)
- Turbulence Parameter เป็นค่าเริ่มต้นที่โปรแกรมตั้งมา
- Solid Parameter
  Initial solid temperature คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของของแข็ง

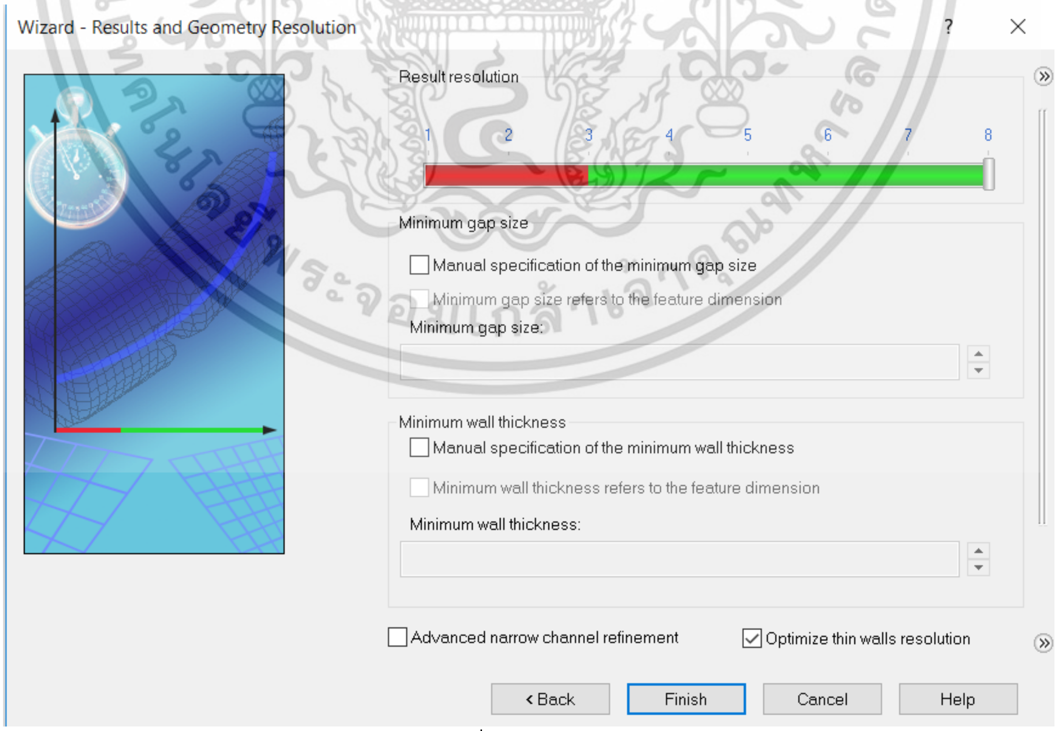
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 กำหนดเงื่อนไข

8) ความละเอียดในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับการตั้งค่า Mesh แสดงดังรูปที่ 3.32

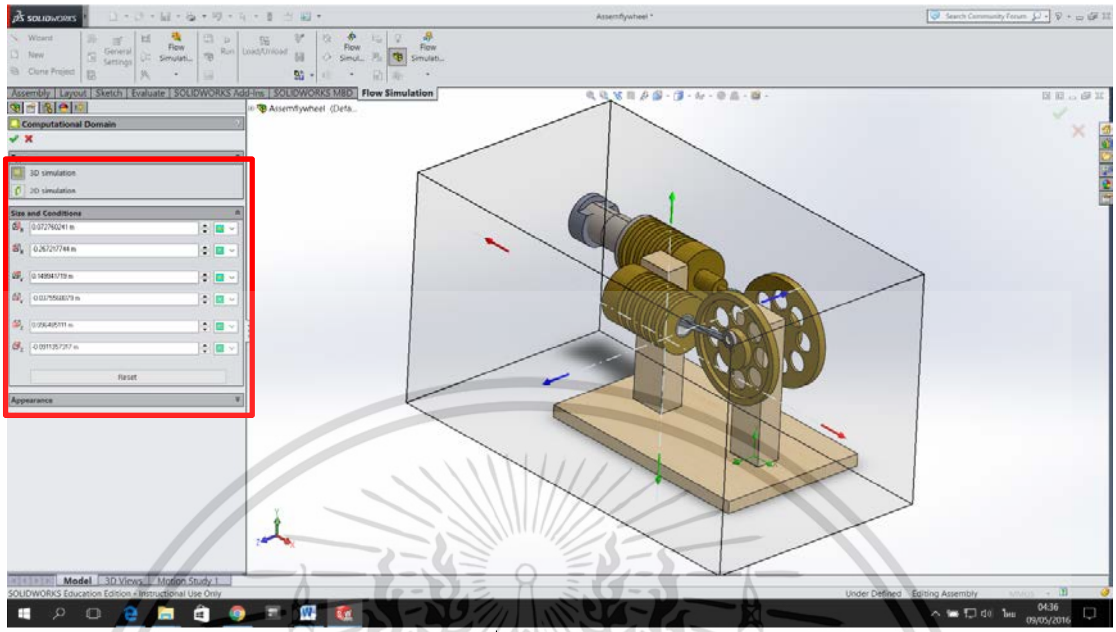
- Mesh คือ โครงสร้างตาข่าย ที่จะแบ่งชิ้นงานเป็นชิ้นเล็กๆให้เหมาะกับการคำนวณ (การตัด Cross-section)



รูปที่ 3.32 Mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) การกำขอบเขตของการคำนวณของโปรแกรม Domain ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 Domain

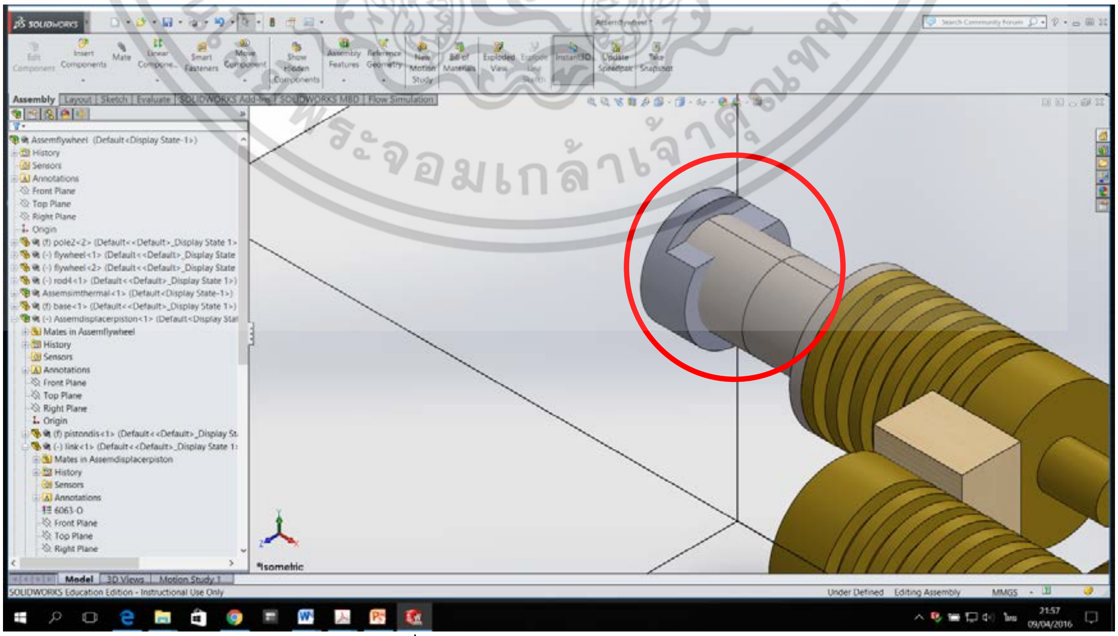
- Domain คือ ขอบเขตของการคำนวณ สามารถเลือกได้ตามแกน X Y Z และกำหนดเองได้โดยคลิกที่ลูกศรของแต่ละแกน ตัวอย่าง ในกรอบสีแดง

  X = 0.072760241 m, -0.267217744 m

  Y = 0.149941719 m, -0.0375568079 m

  Z = 0.096485111 m, -0.0911357317 m

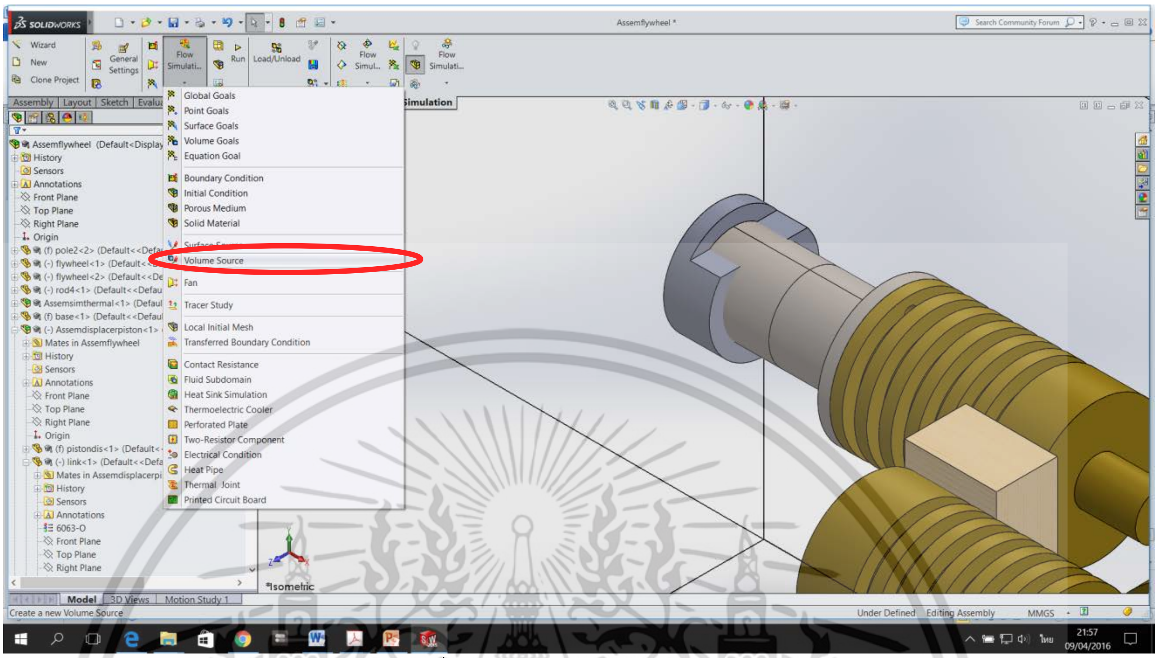
10) สร้างปริมาตรของเปลวไฟจำลองและใส่บริเวณที่สัมผัสเปลวไฟ ดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 จำลองปริมาตรเปลวไฟ

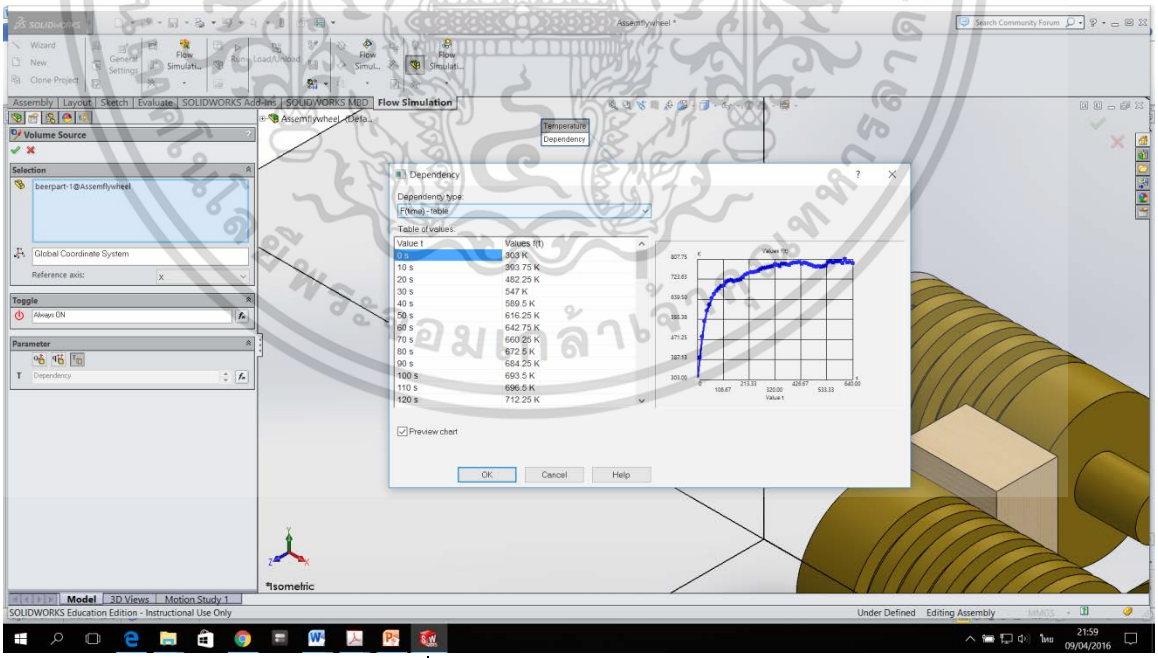
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11) เลือกเงื่อนไขของการใส่ความร้อนโดยเลือกแบบปริมาตรความร้อน ดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 Volume Source

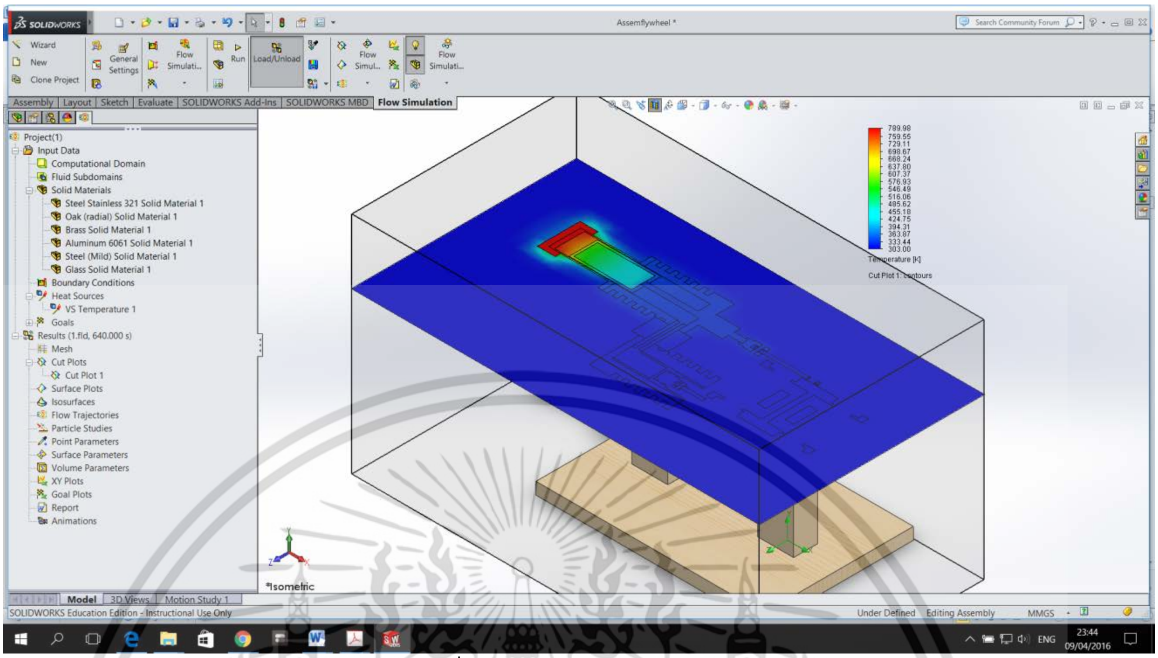
12) กำหนดปริมาตรของความร้อนโดยแปรผันตามเวลาจากผลการทดลอง ตามรูปที่ 3.36



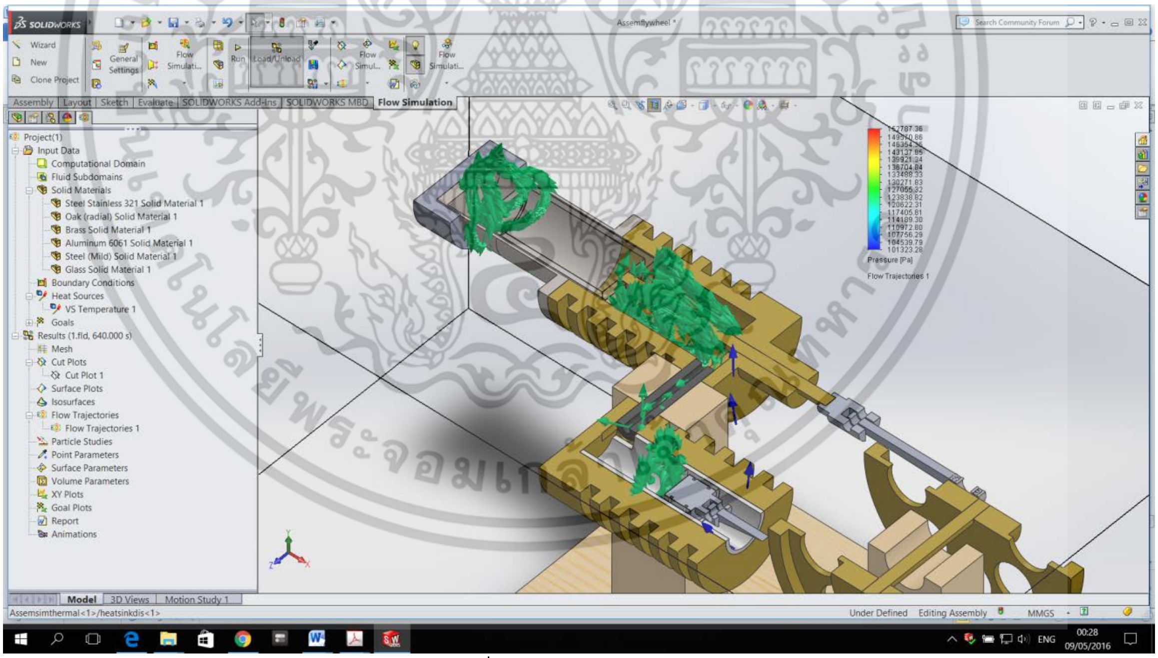
รูปที่ 3.36 Dependency type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13) ตัวอย่างผลจากการ Flow Simulation



รูปที่ 3.37 Temperature



รูปที่ 3.38 Pressure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

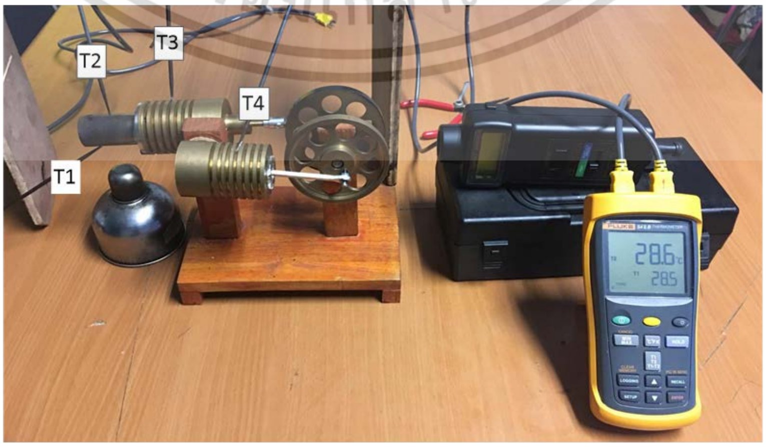
บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาขนาดเล็กนั้นถูกแบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ ทดสอบการทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่ออกแบบและสร้างเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ การเปรียบเทียบอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ระหว่างการทดลองกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการจำลองการไหลของอากาศระหว่างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

4.1 ทดสอบการทำงานหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

วิธีการทดสอบ

1. จัดอุปกรณ์เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยทำการวัดอุณหภูมิ และความเร็วรอบดังรูปที่ 4.1
2. ให้ความร้อนกับกระบอกสูบร้อนของเครื่องยนต์ด้วยตะเกียงแอลกฮอร์โดยเริ่มจับเวลาตั้งแต่ 0 – 900 วินาที พร้อมกับทำการวัดอุณหภูมิของกระบอกสูบฝั่งร้อนที่ตำแหน่ง T_1 และ T_2 และวัดอุณหภูมิของกระบอกสูบเย็นที่ตำแหน่ง T_3 และ T_4 ทุกๆ 10 วินาที บันทึกผลการวัดอุณหภูมิ T_1, T_2 ลงในตารางที่ ผ.1 และ T_3, T_4 ลงในตารางที่ ผ.2
3. ทำการวัดความเร็วรอบตั้งแต่เวลา 0 – 900 วินาที ทุกๆ 10 วินาที บันทึกผลการวัดความเร็วรอบลงในตารางที่ ผ.3
4. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 2- ข้อ 3 อีก 2 ครั้ง โดยต้องให้เครื่องยนต์หยุดทำงาน (ไม่ให้ความร้อน) และรอให้เครื่องยนต์เย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนทุกครั้ง
5. นำผลการทดลองค่าอุณหภูมิมาคำนวณหาปริมาตร ความดัน กำลัง และประสิทธิภาพเชิงความร้อน จากสมการที่ 2.9 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การจัดตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์หาปริมาตรขยายจากตารางที่ 3.2 และค่าความดันจากสมการที่ 2.6 โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ ผ.1 และ ผ.2 ที่มุมข้อเหวี่ยง 90° ดังนี้

ปริมาตรขยาย

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

$$V_E = \frac{8.835\ cm^3}{2}(1\text{-}\cos 90) + 5.890\ cm^3$$

$$V_E = 10.3075\ cm^3$$

$$V_{DE} = \frac{\pi D_{dis}^2 L}{4}. \tag{2.6}$$

$$V_{DE} = \frac{\pi(2.50\ cm)^2(1.20\ cm)}{4}$$

$$V_{DE} = 5.8904\ cm^3$$

ปริมาตรอัดตัว

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

$$V_C = \frac{(8.8357\ cm^3)}{2}[1+\cos(90)] + \frac{(3.1808\ cm^3)}{2}\left[1\text{-}\cos(90 - \varphi)\right] + (4.7712\ cm^3)$$

$$V_C = 9.1890\ cm^3$$

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

$$V_{DC} = \frac{1}{4}\begin{pmatrix} \pi(2.50\ cm)^2[10.90\ -\ (1.20\ +\ 1.80\ +\ 7.00)(cm)] \\ +\pi(1.50\ cm)^2[6.00\ -\ (1.20\ +\ 1.80\ +\ 2.80)(cm)] \end{pmatrix}$$

$$V_{DC} = 4.7712\ cm^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าความดัน

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

$$P = \frac{(101.3kPa)\sqrt{1 - (0.3066)^2}}{1 - (0.3066)\cos(90 - 41.5423)}$$

$$P = 121.03 \text{ kPa}$$

เมื่อ p_{mean} = 1.013 bars

λ=0.3066 อัตราส่วนระหว่าง A และ B ซึ่งเขียนได้

$$A = \left(\gamma^2 + 2(\gamma - 1)\chi_s\cos\varphi + \chi_s^{\,2} - 2\gamma + 1\right)^{1/2} \qquad (2.10)$$

$$A = \left((0.5348)^2 + 2(0.5348 - 1)(1.3599)\cos 90 + (1.3599)^2 - 2(0.5348) + 1\right)^{1/2}$$

$$A = 1.4372$$

จากคำนวณได้พิจารณา V_R มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากเครื่องยนต์ลิงนี้ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

$$B = (\gamma + 2\gamma\upsilon + \frac{4\gamma V_R}{1+\gamma} + \chi_s + 2\varsigma + 1) \qquad (2.11)$$

$$B = ((0.5348) + 2(0.5348)(0.6666) + \frac{4\gamma(0)}{1+\gamma} + (1.3599) + 2(0.5399) + 1)$$

$$B = 4.6874$$

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

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{(1.3599)\sin(90)}{(0.5348) + \cos(90) + 1}\right)$$

$$\delta = 41.5423^{o}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_H ได้จากการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยรอบฮีตเตอร์

$\gamma = T_C/T_H$, $T_H = 574.00$ K และ $T_C = 307.00$ K ดังนั้น $\gamma = 0.5348$

$\chi_s = (V_{SD}+V_{SP})/V_{SD}$, $\chi_s = 1.3599$

$\upsilon = V_{DE}/V_{SD}$, $\upsilon = 0.6666$

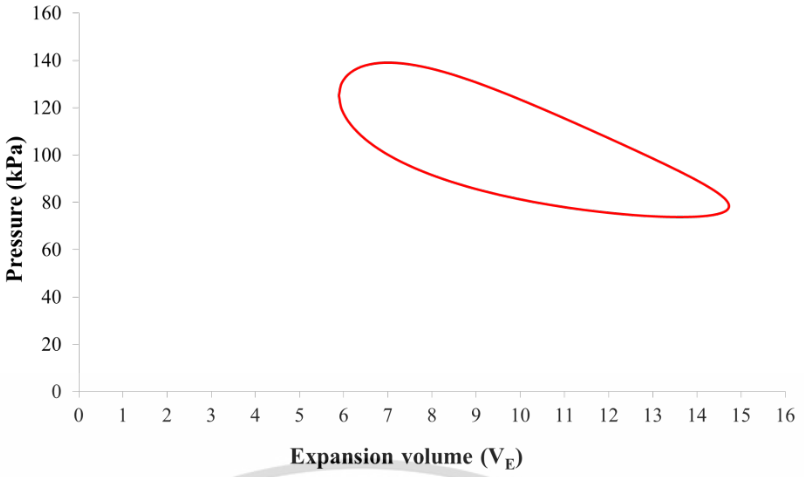
$\varsigma = V_{DC}/V_{SD}$, $\varsigma = 0.5399$

ตารางที่ 4.1 ความดันภายในระบบและปริมาตรขยายที่ค่ามุมข้อเหวี่ยงต่างๆ

Crank angle (degree)	Expansion volume (cm^3)	Pressure (kPa)	Crank angle (degree)	Expansion volume (cm^3)	Pressure (kPa)
0	5.89	125.14	190	14.66	76.45
10	5.96	130.53	200	14.46	75.03
20	6.16	134.89	210	14.13	74.15
30	6.48	137.82	220	13.69	73.80
40	6.92	139.03	230	13.15	73.98
50	7.47	138.39	240	12.52	74.70
60	8.10	135.96	250	11.82	75.95
70	8.80	132.00	260	11.08	77.75
80	9.54	126.88	270	10.31	80.13
90	10.31	121.03	280	9.54	83.09
100	11.08	114.84	290	8.80	86.66
110	11.82	108.65	300	8.10	90.85
120	12.52	102.72	310	7.47	95.63
130	13.15	97.22	320	6.92	100.97
140	13.69	92.26	330	6.48	106.79
150	14.13	87.89	340	6.16	112.92
160	14.46	84.13	350	5.96	119.14
170	14.66	80.98	360	5.89	125.14
180	14.73	78.42	-	-	-

จากผลการคำนวณหาค่าความดันภายในและปริมาตรขยายที่ค่ามุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ดังตารางที่ 4.1 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในเครื่องยนต์กับปริมาตรขยายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรขยาย

รูปที่ 4.2 บ่งบอกว่าเครื่องยนต์นั้นทำงานเนื่องจากกราฟมีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟในอุดมคติแสดงให้เห็นถึงค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 139.03 kPa และจากรูปที่ 4.2 ยังบอกถึงปริมาตรตายและปริมาตรกวาด ในการวิเคราะห์หากำลังด้านออกและประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์และงานที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลทำงาน (W_E) สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$W_E = \oint PdV_E = \frac{p_{mean} V_{SD} \pi \lambda \sin\delta}{1+\sqrt{1-\lambda^2}}$$

$$= \left(\frac{(101.3kPa)(8.8357cm^3) \times \pi \times 0.3066 \times \sin(41.5423°)}{1+\sqrt{1-(0.3066)^2}} \right)$$

$$= 292.9242 \text{ mJ}$$

งานที่เกิดจากการอัดตัวตัวของของไหลทำงาน (W_C) สามารถหาได้จากสมการ

$$W_C = \oint PdV_C = -\frac{p_{mean} V_{SD} \pi \lambda \gamma \sin\delta}{1+\sqrt{1-\lambda^2}}$$

$$= -\left(\frac{(101.3kPa)(8.8357cm^3) \times \pi \times 0.3066 \times 0.5348 \times \sin(41.5423°)}{1+\sqrt{1-(0.3066)^2}} \right)$$

$$= -156.6558 \text{ mJ}$$

งานในหนึ่งรอบวัฏจักร (W_i) สามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_i = W_E + W_C$$

$$= (292.9242\ \text{mJ}) + (-156.6558\ \text{mJ})$$

$$= 136.2684\ \text{mJ}$$

รอบสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ 783 รอบต่อนาที กำลังขาออกของเครื่องยนต์ (P_i) หาได้จากสมการ

$$P_i = W_i \times N$$

$$= \frac{(136.2684\ \text{mJ})(783\ \text{RPM})}{60\text{s}}$$

$$= 1.778\ \text{W}$$

ดังนั้นกำลังขาออกของเครื่องยนต์มีค่าเท่ากับ 1.778 วัตต์
ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ (η) สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \times 100\%$$

$$= \left(1 - \frac{307\ \text{K}}{547\ \text{K}}\right) \times 100\% = 43.87\%$$

ความเร็วรอบสูงสุดเฉลี่ย 783 RPM นำมาคำนวณหาแรงที่กระทำต่อลูกสูบได้ดังนี้

$$F_I = m_p \omega_c^2 r_P \cos\theta + \frac{m_p \omega_c^2 r_P \cos 2\theta}{n}$$

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

$$F_I = (0.0076\ kg)(2\pi \frac{783}{60})^2 (0.009\ m)\cos(10) + \frac{(0.0076\ kg)(2\pi \frac{783}{60})^2 (0.009\ m)\cos 2(10)}{5}$$

$$F_I = 0.4799\ N$$

l_p คือ ระยะก้านชักของลูกสูบกำลัง, r_p คือ รัศมีข้อเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาแรงบิดที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

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

$$\tau = (0.009\ \text{m})(0.4799\text{N}) \left(\sin(10) + \frac{\sin 2(10)}{2\sqrt{(5)^2 - \sin^2(10)}} \right)$$

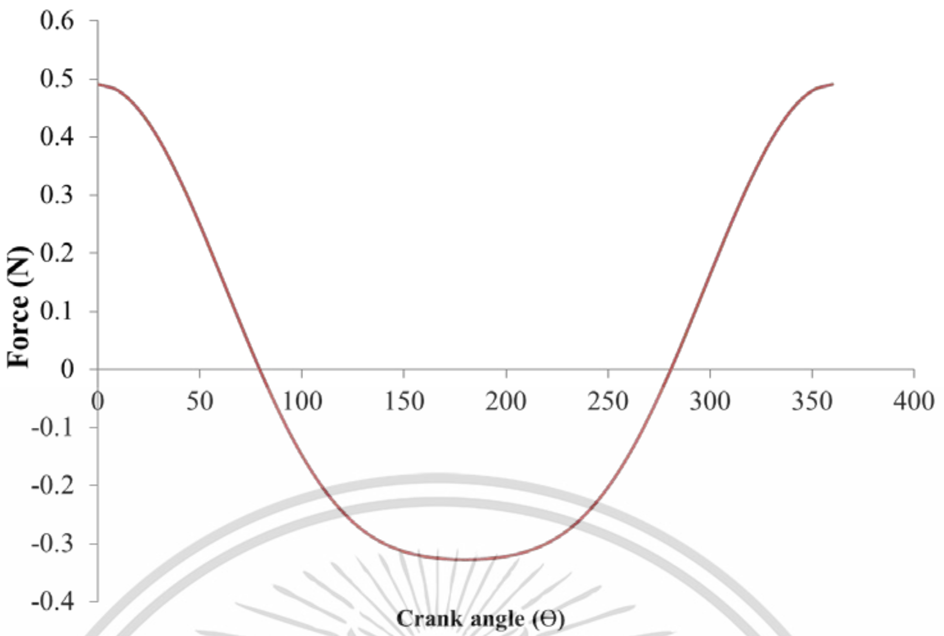
$$\tau = 1.0159\ \text{N-mm}$$

ตารางที่ 4.2 แรงที่เกิดจากการเคลื่อนของลูกสูบและแรงบิดกับมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ

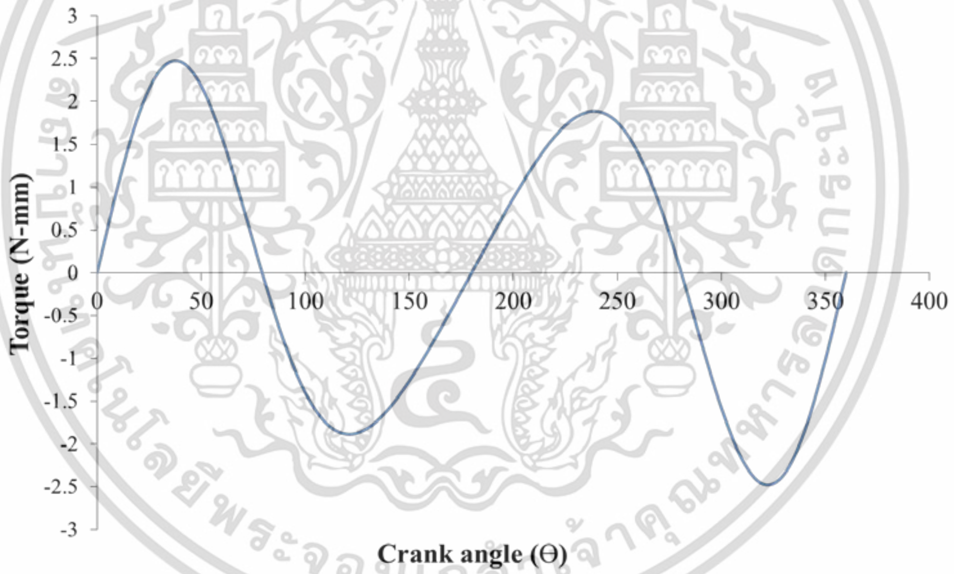
Crank angle (degree)	Force(N)	Torque (N-mm)	Crank angle (degree)	Force(N)	Torque (N-mm)
0	0.4911	0.0000	190	-0.3261	0.4422
10	0.4799	1.0159	200	-0.3218	0.8702
20	0.4472	1.8500	210	-0.3135	1.2638
30	0.3953	2.3593	220	-0.2993	1.5928
40	0.3277	2.4687	230	-0.2773	1.8160
50	0.2488	2.1825	240	-0.2455	1.8856
60	0.1637	1.5781	250	-0.2027	1.7564
70	0.0773	0.7825	260	-0.1480	1.3996
80	-0.0058	-0.0599	270	-0.0818	0.8184
90	-0.0818	-0.8184	280	-0.0058	0.0599
100	-0.1480	-1.3996	290	0.0773	-0.7825
110	-0.2027	-1.7564	300	0.1637	-1.5781
120	-0.2455	-1.8856	310	0.2488	-2.1825
130	-0.2773	-1.8160	320	0.3277	-2.4687
140	-0.2993	-1.5928	330	0.3953	-2.3593
150	-0.3135	-1.2638	340	0.4472	-1.8500
160	-0.3218	-0.8702	350	0.4799	-1.0159
170	-0.3261	-0.4422	360	0.4911	0.0000
180	-0.3274	0.0000	-	-	-

จากผลการคำนวณหาค่าแรงและแรงบิดที่เกิดขึ้น ที่มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ แสดงผลคำนวณดังตารางที่ 4.2 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงกับแรง



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อเหวี่ยงกับแรงบิด

จากรูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับมุมข้อเหวี่ยง ตั้งแต่มุม 0-180 องศา คือ การเคลื่อนที่ของลูกสูบหรือการขยายตัวของอากาศดังนั้นแรงที่ใช้ในการผลักลูกสูบจึงค่อยๆลดลงและตั้งแต่มุม 180-360 องศา คือการเคลื่อนกลับไปยังจุดเดิมของลูกสูบหรือการบีบอัดตัวของอากาศจะทำให้เกิดแรงจากการดูดตัวกลับ และรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าแรงบิดสูงสุดอยู่ที่มุม 40 องศา ซึ่งตรงกับค่าความดันสูงสุดที่ 40 องศาเช่นเดียวกันจากตารางที่ 4.1 และ 4.2

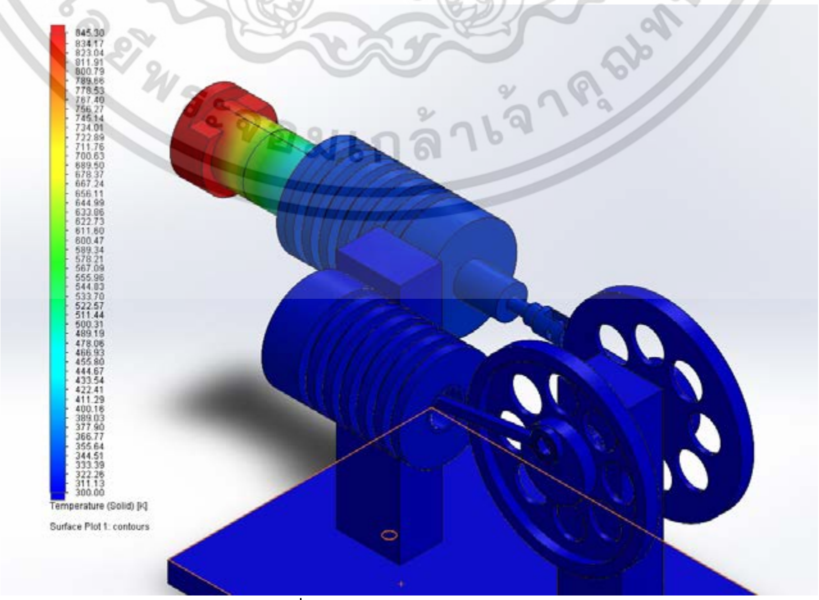
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ระหว่างการทดลองกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์

Flow simulation ของโปรแกรม solidWorks ถูกนำมาใช้เป็นแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบหาอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ โดยการนำค่าอุณหภูมิ T_1 จากการวัดอุณหภูมิของเครื่องยนต์ทำงาน (จากผลการทดสอบตอนที่ 1) เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงของแบบจำลอง (T_1 เปรียบเสมือนตะเกียงแอลกอฮอล์) ดังรูปที่ 4.5 และกำหนดให้การไหลของความร้อนภายในเครื่องยนต์เป็นเวลา 900 วินาที(โปรแกรมทำงานต่อเนื่อง 340 ชั่วโมง) โดยมีเงื่อนไขดังตารางที่ 4.3 ผลการไหลของความร้อนที่อุณหภูมิ T_2 ของกระบอกสูบร้อน สำหรับ T_3 และ T_4 ของกระบอกสูบเย็น จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบวัดอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์ที่ผิวของกระบอกทั้งสอง ดังตารางที่ ผ.4 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิ T_2, T_3 และ T_4 กับเวลา จะแสดงผลการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขของการ Flow simulation

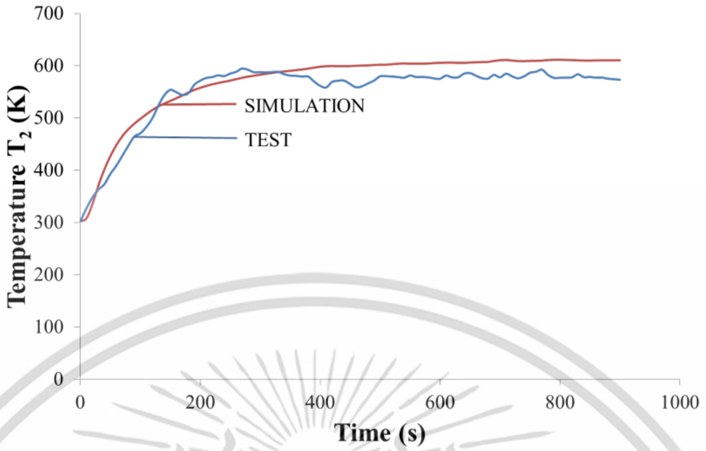
ชนิด	**ลักษณะ**	**ชนิด**	**ลักษณะ**
External flow	Laminar and turbulence	Working fluid	Air
Initial solid temperature	300.00 K	Materials	Aluminum, brass, stainless steel, glass and wood
Ambient temperature	302.80 K	Mean pressure	101.32 kPa
Mesh size	1 mm x 1mm	Gravity force	9.81 m/s^2
Heat conduction in solid	Time dependent	Turbulent intensity	0.10 %



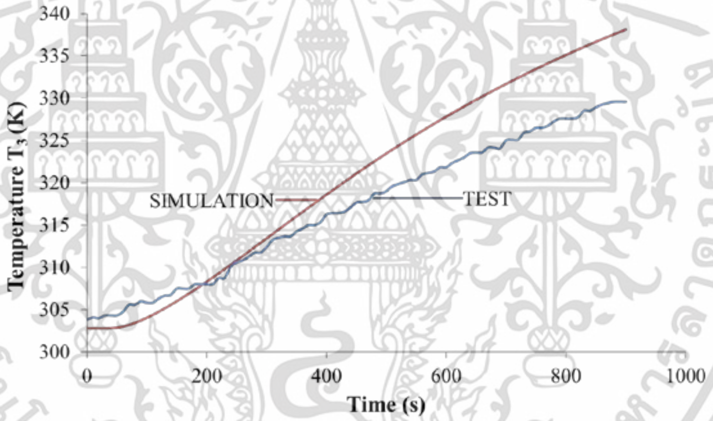
รูปที่ 4.5 ภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (T_1 เปรียบเสมือนตะเกียงแอลกอฮอล์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

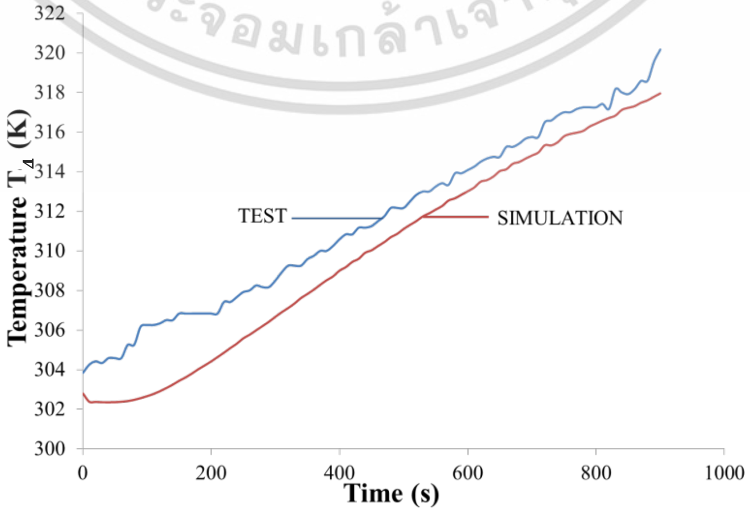
จากรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ T_2, T_3 และ T_4 ที่ผิวของกระบอกสูบร้อนและกระบอกสูบเย็นของเครื่องยนต์ระหว่างการทดลองและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิ T_2 จากการทดลองกับ Flow simulation



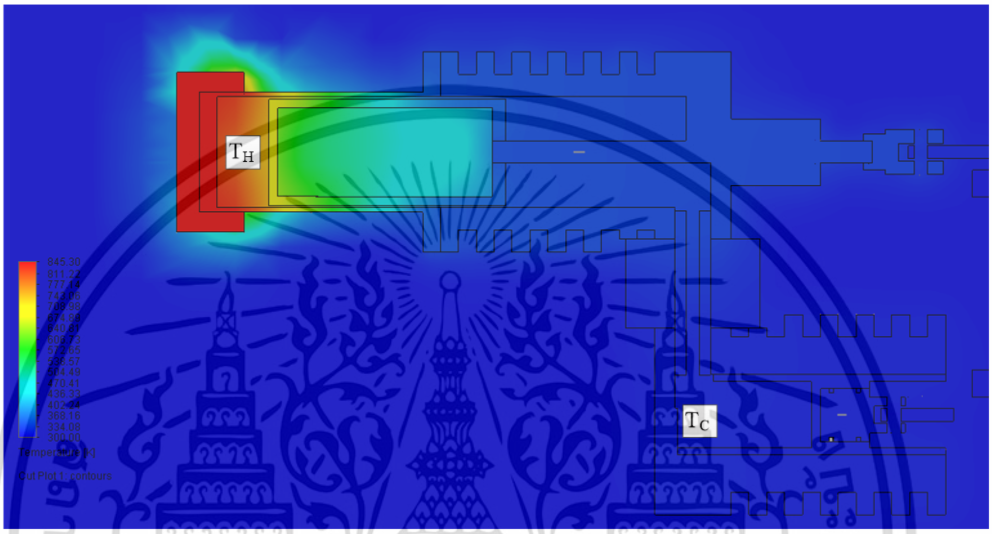
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิ T_3 จากการทดลองกับ Flow simulation



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิ T_4 จากการทดลองกับ Flow simulation

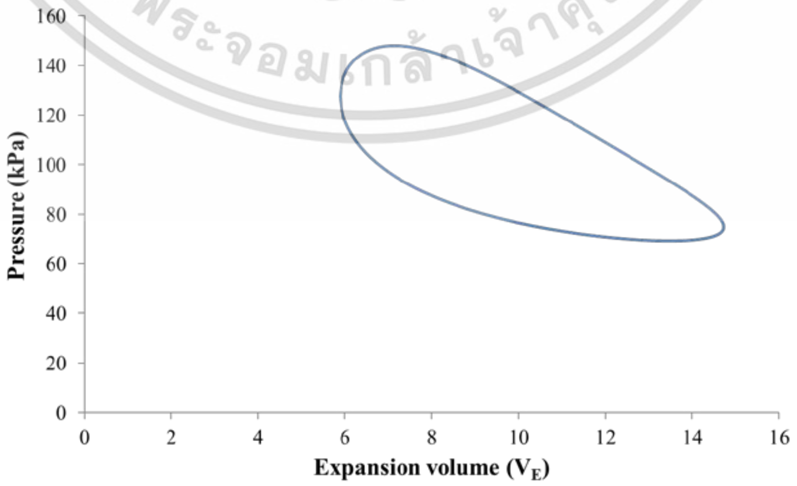
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปรียบเทียบการทดลองและการจำลองการไหลทางความร้อน (มีลูกสูบดิสเพรสเซอร์อยู่ภายในกระบอกสูบดิสเพรสเซอร์) ดังรูปที่ 4.6, 4.7, และ 4.8 พบว่าอุณหภูมิการทำงานที่ผิวของกระบอกสูบทั้งสองของเครื่องยนต์ในขณะที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งเครื่องยนต์ทำงานที่เวลา 180 วินาที ค่าอุณหภูมิ คือ $T_2 = T_H = 548.71$ K และ $T_4 = T_C = 304.02$ K มีความสอดคล้องกันและไปในทิศทางเดียวกันซึ่งจะบ่งบอกว่าเงื่อนไขและการจำลองการไหลมีความถูกต้องสามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการจำลองการไหลของอากาศที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ระหว่างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (ไม่มีลูกสูบดิสเพรสเซอร์อยู่ภายในกระบอกสูบดิสเพรสเซอร์)



รูปที่ 4.9 การไหลของความร้อนภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

ผลการวัดอุณหภูมิของอากาศภายในกระบอกสูบจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ ผ.5 ซึ่งเครื่องยนต์ทำงานที่เวลา 180 วินาที ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน คือ $T_H = 753.91$ K และ $T_C = 302.79$ K นำสมการที่ 2.9, 2.10, 2.11 และ 2.12 มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรขยาย แสดงผลการคำนวณดังรูปที่ 4.10



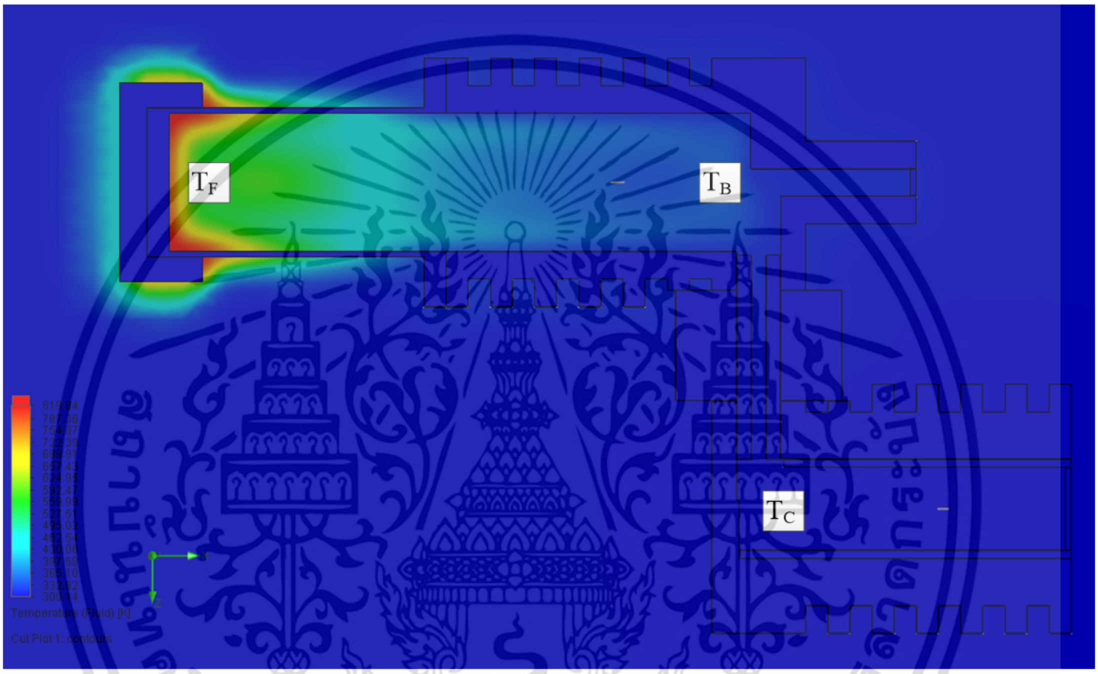
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรขยาย
(อุณหภูมิของอากาศภายในกระบอกสูบ) ที่เวลา 180 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

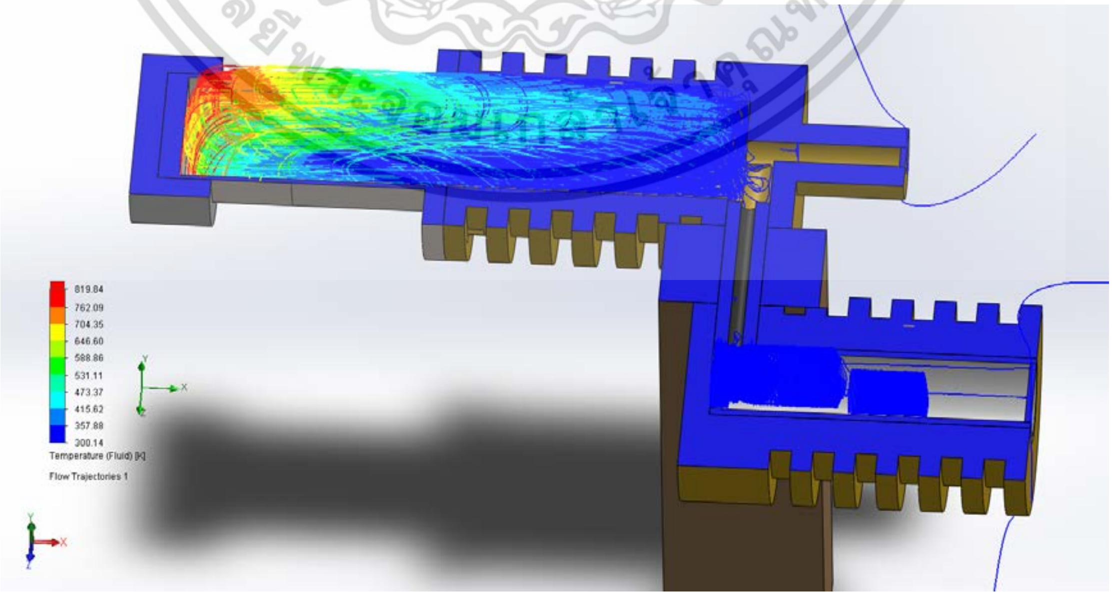
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการจำลองการไหลของอากาศที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ระหว่างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

4.3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

การจำลองการไหลทางความร้อนด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ได้ตั้งเงื่อนไขตามตารางที่ 4.3 และนำลูกสูบออกเพราะเนื่องจากในการจำลองการไหลทางความร้อนนั้นลูกสูบไม่ได้มีการเคลื่อนที่จึงไม่มีการเคลื่อนที่ของอากาศภายใน วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_F , T_B ,T_C ดังรูปที่ 4.11 และแสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.11 การไหลของความร้อนภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์



รูปที่ 4.12 เส้นแสดงอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

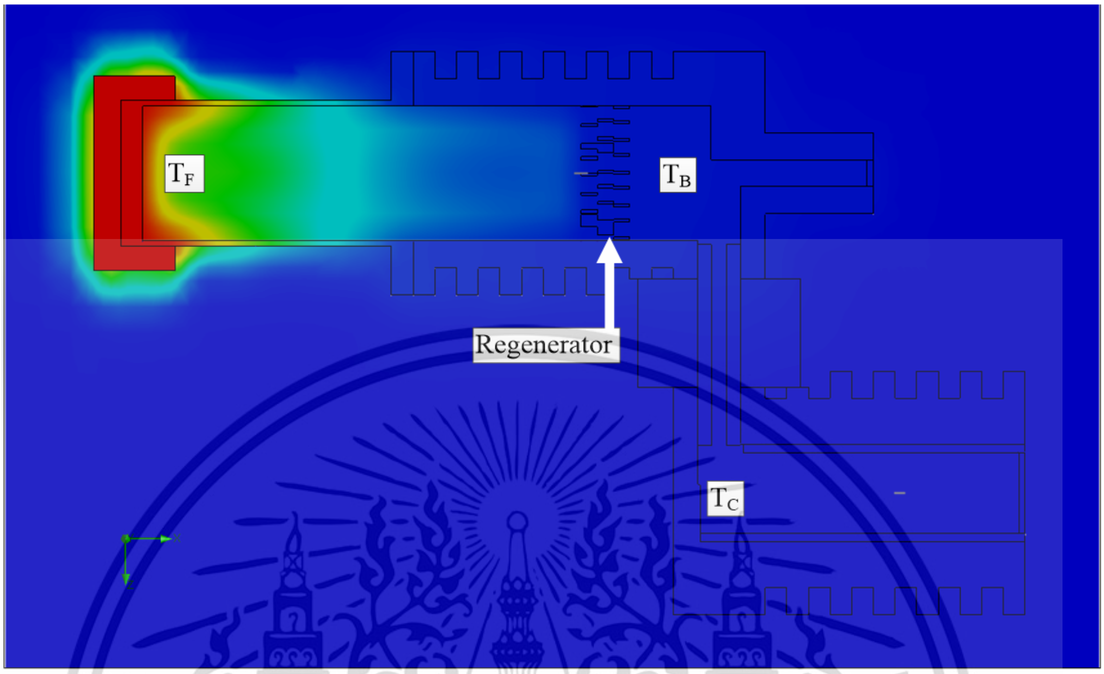
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิที่จุด T_F, T_B และ T_C ของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

Time (s)	Temperature (K) (T_F)	Time (s)	Temperature (K) (T_B)	Time (s)	Temperature (K) (T_C)
0	300.00	0	300.00	0	300.00
10	364.95	10	300.80	10	300.00
20	381.03	20	306.22	20	300.01
30	412.46	30	310.77	30	300.01
40	440.56	40	314.97	40	300.01
50	464.87	50	318.68	50	300.02
60	484.88	60	321.86	60	300.02
70	498.77	70	324.35	70	300.03
80	509.82	80	326.42	80	300.04
90	518.95	90	328.21	90	300.05
100	527.72	100	329.82	100	300.06
110	536.15	110	331.40	110	300.08
120	541.67	120	332.66	120	300.09
130	545.08	130	333.75	130	300.12
140	548.23	140	334.74	140	300.14
150	552.17	150	335.75	150	300.17
160	556.24	160	336.76	160	300.21
170	562.43	170	337.93	170	300.24
180	564.57	180	339.11	180	300.28
190	568.54	190	339.87	190	300.33
200	570.50	200	340.72	200	300.38
210	572.23	210	341.54	210	300.43
220	572.89	220	342.31	220	300.48
230	573.44	230	342.98	230	300.54
240	574.59	240	343.68	240	300.61
250	577.08	250	344.48	250	300.67
260	579.10	260	345.26	260	300.74
270	579.86	270	345.97	270	300.82
280	580.49	280	346.64	280	300.89
290	581.26	290	347.30	290	300.97
300	582.76	300	348.00	300	301.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการไหลในขณะที่มีรีเจนเนอเรเตอร์โดยวัดอุณหภูมิที่จุด T_F, T_B และ T_C แสดงดังรูปที่ 4.14 และผลที่วัดได้จากโปรแกรมแสดงดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.13 การไหลของความร้อนภายใน (ไม่มีกระบอกสูบ) ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์

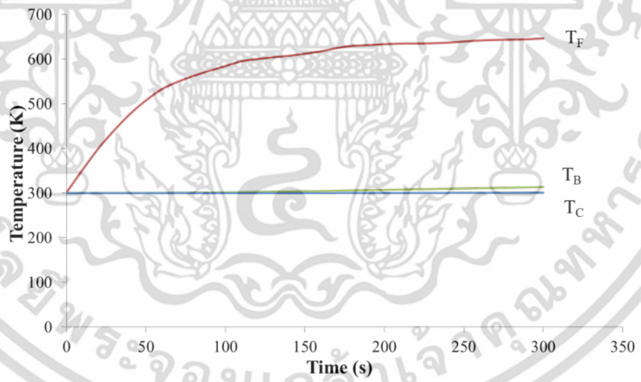
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิที่จุด T_F, T_B และ T_C ของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์

Time (s)	Temperature (K) (T_F)	Time (s)	Temperature (K) (T_B)	Time (s)	Temperature (K) (T_C)
0	300.00	0	300.00	0	300.00
10	352.10	10	300.01	10	300.00
20	400.10	20	300.02	20	300.01
30	441.13	30	300.05	30	300.01
40	477.74	40	300.12	40	300.02
50	507.98	50	300.22	50	300.02
60	533.07	60	300.37	60	300.03
70	549.50	70	300.59	70	300.03
80	562.83	80	300.86	80	300.04
90	574.10	90	301.20	90	300.05
100	584.66	100	301.60	100	300.06
110	595.39	110	302.07	110	300.08
120	600.40	120	302.56	120	300.09
130	604.33	130	303.10	130	300.11
140	607.76	140	303.65	140	300.14
150	612.49	150	304.24	150	300.16

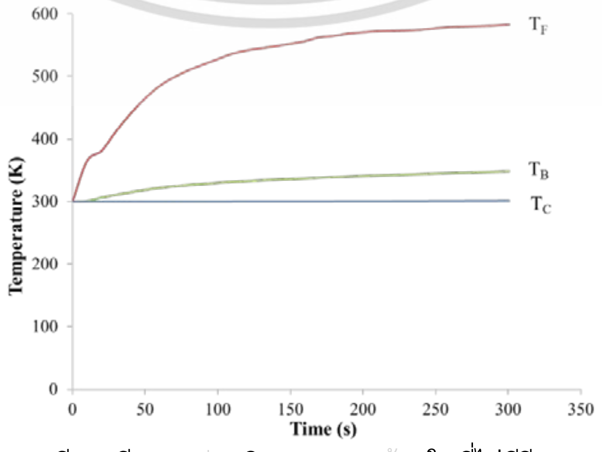
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) อุณหภูมิที่จุด T_F, T_B และ T_C ของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์

Time (s)	Temperature (K) (T_F)	Time (s)	Temperature (K) (T_B)	Time (s)	Temperature (K) (T_C)
160	617.55	160	304.84	160	300.19
170	625.04	170	305.46	170	300.23
180	629.91	180	306.09	180	300.26
190	631.48	190	306.73	190	300.30
200	633.67	200	307.36	200	300.34
210	634.92	210	308.01	210	300.39
220	635.20	220	308.65	220	300.44
230	635.50	230	309.30	230	300.49
240	637.05	240	309.94	240	300.54
250	639.70	250	310.59	250	300.60
260	642.02	260	311.23	260	300.66
270	643.08	270	311.87	270	300.73
280	643.78	280	312.50	280	300.79
290	644.66	290	313.12	290	300.86
300	646.59	300	313.74	300	300.93

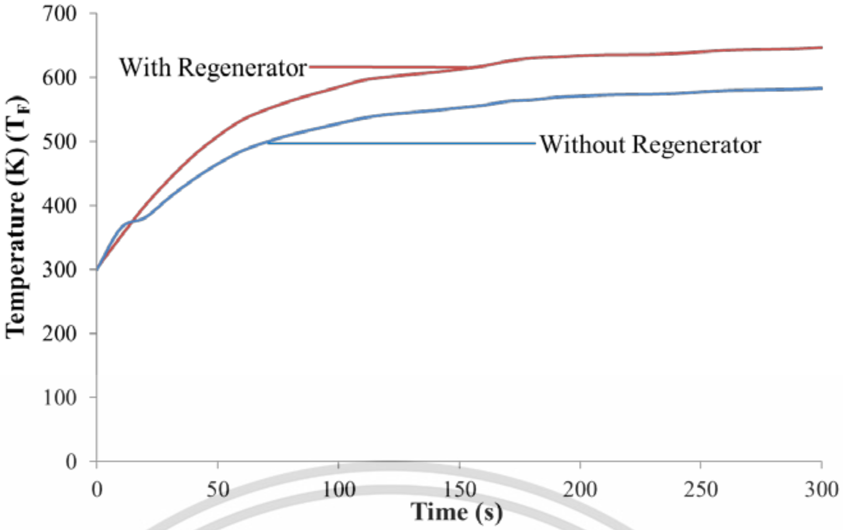


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในที่มีรีเจนเนอเรเตอร์

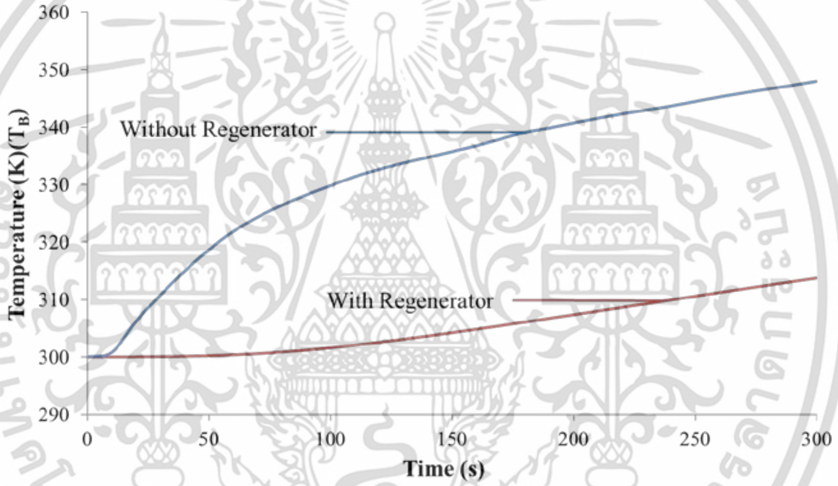


รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

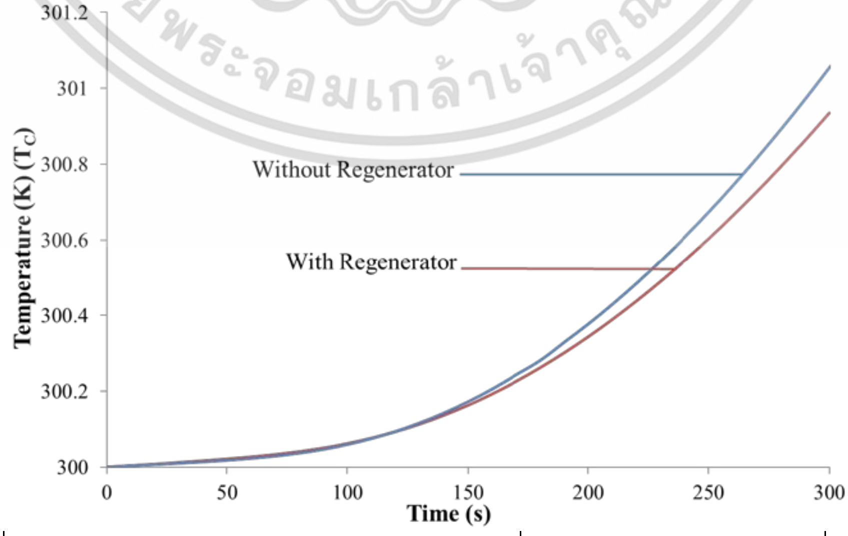
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในที่จุด T_F ที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

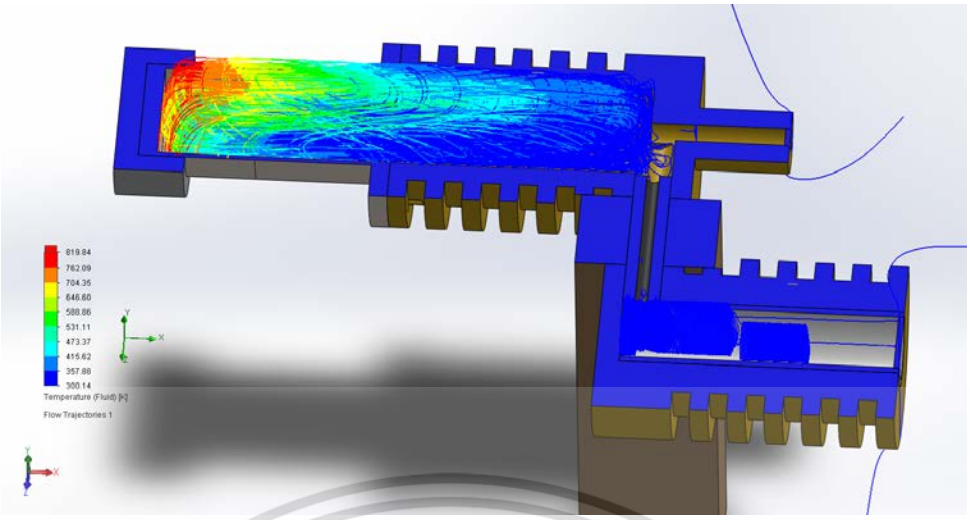


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ที่จุด T_B

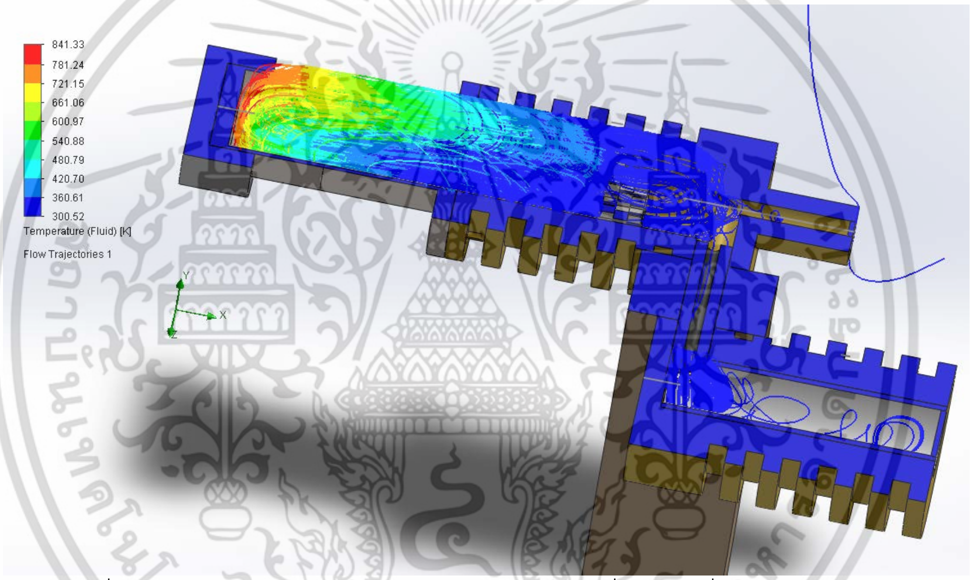


รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ที่จุด T_C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 เส้นแสดงอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์



รูปที่ 4.20 เส้นแสดงอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์

จากรูปที่ 4.14 ความต่างของอุณหภูมิที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ คือ $\Delta T = T_F - T_C = 329.65$ K เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.15 ความต่างของอุณหภูมิที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ คือ $\Delta T = 262.29$ K แสดงว่าค่าความต่างของอุณหภูมิเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์นั้นมีค่ามากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_F, T_B และ T_C ของเครื่องยนต์ที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์นั้นจะเห็นได้ว่าที่จุด T_F ของเครื่องยนต์ที่มีมีรีเจนเนอเรเตอร์อุณหภูมิจะสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ไม่มีมีรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งพบว่ามีการนำความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์กลับมาใช้ได้อีก ดังรูปที่ 4.16 นอกจากนั้นที่จุด T_B และ T_C ของเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์มีอุณหภูมิที่ต่ำลงเนื่องจากรีเจนเนอเรเตอร์ดูดซับความร้อนไว้บางส่วน ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ และการไหลของความร้อนจากรูปที่ 4.19 เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.20 ภายในเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์นั้นจะมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ คือ 46.46% และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ คือ 52.33%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการทดสอบวัดอุณหภูมิเครื่องยนต์สเตอริงค์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์

จากการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาแบบล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่ซึ่งเมื่อให้ความร้อนโดยใช้ตะเกียงแอลกฮอร์เป็นแหล่งกำเนิด เครื่องยนต์เริ่มต้นทำงานที่เวลา 180 วินาที ซึ่งพบว่าล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่ไม่เกิดการสั่นในขณะทำงาน ดังนั้นการใช้ล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่เพื่อปรับให้เกิดสมดุลของแรงที่เพลาจึงทำให้เครื่องยนต์มีการทำงานนานได้อย่างต่อเนื่อง จากนั้นทำการทดสอบเครื่องยนต์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ อุณหภูมิ ค่าความดัน ($\mathbf{P}$) งานสุทธิ ($\mathbf{W}_i$) ความเร็วรอบ (RPM) กำลัง ($\mathbf{P}_i$) และประสิทธิภาพทางความร้อน (η) โดยทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของกระบอกสูบร้อนและกระบอกสูบเย็น 4 ตำแหน่ง (T_1, T_2, T_3, T_4) พร้อมกับการวัดความเร็วรอบในช่วงเวลา 0 ถึง 900 วินาที และบันทึกผลที่ทุกๆ 10 วินาที พบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิกระบอกสูบร้อน กระบอกสูบเย็น และความเร็วรอบ ที่เวลา 180 วินาที คือ $T_2 = T_H = 547.30$ K, $T_4 = T_C = 306.84$ K และ 783 RPM ตามลำดับ ผลการคำนวณค่าความดัน งานสุทธิ กำลัง และประสิทธิภาพทางความร้อน ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 139.03 kPa, 136.26 mJ, 1.78 W และ 43.87% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับล้อเกียร์กระตุ้นกำลังเดี่ยวที่ผ่านมานั้นผลการทดสอบจะบ่งบอกถึงการออกแบบและสร้างล้อเกียร์กระตุ้นกำลังคู่เพื่อปรับให้เกิดสมดุลของแรงที่เพลาทำให้ไม่เกิดการสูญเสียในทางเชิงกลทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพที่ดีและมีความเร็วรอบที่สูงส่งผลต่อเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้นตามอีกด้วย

5.1.2 ผลการปรียบเทียบอุณหภูมิการทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์และการทดลอง

การเปรียบเทียบอุณหภูมิการทำงานที่ผิวโลหะของเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (มีลูกสูบดิสเพรสเซอร์อยู่ภายในกระบอกสูบดิสเพรสเซอร์) ซึ่งในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ได้นำ T_1 จากผลการวัดค่าอุณหภูมิในขณะเครื่องยนต์ทำงานจริงมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน และมีเงื่อนไขตามตารางที่ 4.3 วัดอุณหภูมิ T_2, T_3 และT_4 ตั้งแต่ 0-900 วินาที อุณหภูมิที่ผิวของกระบอกสูบร้อน คือ $T_H = 548.71$ K และกระบอกสูบเย็นคือ $T_C = 304.02$ K ค่าประสิทธิภาพทางความร้อน คือ 44.59% จะเห็นว่าอุณหภูมิการทำงานที่ผิวของเครื่องยนต์ในการทดลองและแบบจำลองคอมพิวเตอร์มีผลที่สอดคล้องกันและใกล้เคียงกันมาก และจากผลการวิเคราะห์แบบจำลองคอมพิวเตอร์เครื่องยนต์เริ่มทำงานที่เวลา 180 วินาที อุณหภูมิของอากาศภายในกระบอกสูบร้อน คือ $T_H = 753.91$ K และกระบอกสูบเย็นคือ $T_C = 302.79$ K และเมื่อนำผลอุณหภูมิของอากาศภายในมาคำนวณค่าพารามิเตอร์ คือ ความดัน งานสุทธิ กำลัง และประสิทธิภาพทางความร้อน ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 147.84 kPa, 224.39 mJ, 2.70 W และ 59.83% ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองคอมพิวเตอร์(ทางอุดมคติ) มีแนวโน้มของผลการกำหนดเงื่อนไขใกล้เคียงกันกับผลการทดลองการทำงานตามวัฏจักรสเตอร์ลิงจริง ซึ่งสรุปได้ว่าการกำหนดเงื่อนไขแบบจำลองคอมพิวเตอร์มีความถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีและไม่มีรีเจอเนอเรเตอร์ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (ไม่มีลูกสูบดิสเพรสเซอร์อยู่ภายในกระบอกสูบดิสเพรสเซอร์) ที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์นั้นกำหนดเงื่อนไขให้การไหลของความร้อนภายในกระบอกสูบเครื่องยนต์เป็นดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองการไหลของความร้อน วัดอุณหภูมิของอากาศภายใน 3 จุด คือ T_F, T_B และ T_C ซึ่งนำผลที่ได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบแต่ละจุดระหว่างเครื่องยนต์ที่มีและไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์นั้นพบว่าเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง คือ 52.33% และให้ความต่างอุณภูมิ $\Delta T = 329.65\ K$ ตามลำดับ ส่วนเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์มีประสิทธิภาพทางความร้อนและความต่างอุณภูมิ คือ 46.46% และ $\Delta T = 262.29\ K$ ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ไม่มีรีเจนเนอเรเตอร์เพราะเนื่องจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้วัสดุสแตนเลสจัดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บและรักษาระดับความร้อนได้ดีระหว่างกระบอกสูบร้อนและกระบอกสูบเย็นทำให้ลดการสูญเสียที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนทางความร้อนได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำงานและแก้ไขเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีข้อแนะนำดังต่อไปนี้

1) ในการประกอบล้อเกียร์ควรให้ล้อตรงและแน่น เมื่อทำการหมุนล้อไม่ควรแกว่งไปมา และควรหมุนได้อย่างน้อย 5 วินาที

2) ลดแรงเสียดทานที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อของการเคลื่อนที่ในแต่ละส่วนของเครื่องยนต์ เช่น ใช้ลูกปืนลดการเสียดทานบริเวณแกนล้อ ขัดผิวด้านในของกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์ให้ลื่นที่สุด

3) ในการประกอบเครื่องยนต์ควรตรวจสอบให้เป็นระบบปิด เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วของอากาศหรือทำให้เกิดน้อยที่สุด

4) ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ใช้เวลาในการประมวลนานควรใช้ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ผลที่เร็วยิ่งขึ้น

5) เครื่องยนต์สเตอร์ลิงควรมีรีเจนเนอเรเตอร์อยู่ในระบบการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและสามารถทำงานได้ยาวนานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] จิรภัทร วงศ์เสถียร, นทีเทพ สุวรรณภูมิ, ปัทวี มีทรัพย์สิน. 2557.การออกแบบและพัฒนาความต่างของอุณหภูมิระหว่างกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และกระบอกสูบกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา. โครงงานพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกสิประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[2] จิดาภา วิจฝัน, จินตหรา นิ่งใส. 2555. การวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบขนาดเล็กชนิดแกมมา. โครงงานพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[3] พงษ์ธร จรัญญากรณ์. (2542). อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: บริษัทเอ็มแอนด์อี

[4] พงษ์เจต พรหมวงศ์. (2534). การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[5] พลูพร แสงบางปลา, ดร.อุริช อัชชโคสิต. (2553). ความรู้พื้นฐานวิชาชีพวิศวกรรมเครื่องกล (ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[6] สมชัย อัครทิวา และ ผศ.ดร.ขวัญจิต วงษ์ชารี.(2550) เทอร์โมไดนามิกส์. กรุงเทพมหานคร: แมคกรอ – ฮิล

[7] Bancha Kongtragool, Somchai Wongwises. (2006). Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator. Renewable Energy, 31, 345-359

[8] Colin D.West. Princations and Applications of Stirling Engines. New York: Van Nostrand Reinhold Company.

[9] Gaham Walker.(1980). Stirling Engines. Oxford: The pitman Press, Bath.

[10] Ramla Gheith, Fethi Aloui and Sassi Ben Nasrallah. (2012). Study of the regenerator constituting materialinfluence on a gamma type Stirling engine. Journal of Mechanical Science and Technology, 26, 1251-1255

[11] Pascal Puech and Victoria Tishkova. (2011). Thermodynamic analysis of a Stirling engine including regenerator dead volume. Renewable Energy,36, 872-878

[12] Hang-Suin Yang and Chin-Hsiang Cheng. (2017). Theoretical solutions for power output of thermal-lag Stirling engine. International Journal of Heat and Mass Transfer,111, 191-200.

[13] Mathew J. Rodrigues and James A. Liburdy. (2016). Transient heat transfer model and verification for gas cylinder expansion. International Journal of Heat and Mass Transfer. 102, 241–250.

[14] Vivek Patel, Vimal Savsani and Anurag Mudgal. (2017). Many-objective thermodynamic optimization of Stirling heat engine. Journal of Energy. 125, 629-642.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[15] Ruijie Li , Lavinia Grosu and Wei Li. (2017). New polytropic model to predict the performance of beta and gamma type Stirling engine. Journal of Energy.128, 62 – 76.

[16] Fatih Aksoy , Halit Karabulut , Can Çınar , Hamit Solmaz , Yasar Onder Ozgoren and Ahmet Uyumaz (2015). Thermal performance of a Stirling engine powered by a solar simulator. Journal of Applied Thermal Engineering. 86 , 161-167.

[17] Zhengchang Song , Jianmei Chen and Li Yang. (2015). Heat transfer enhancement in tubular heater of Stirling engine for waste heat recovery from flue gas using steel wool. Journal of Applied Thermal Engineering. 87 , 499-504.

[18] Hang-Suin Yang and Chin-Hsiang Cheng. (2016). Stability analysis of thermal-lag Stirling engines. Journal of Applied Thermal Engineering. 106 ,712–720.

[19] Suliman Alfarawi , Raya k. AL-Dadah and Saad Mahmoud. (2016). Enhanced thermodynamic modelling of a gamma-type Stirling engine. Applied Thermal Engineering. 106, 1380–1390.

[20] Gang Xiao, Umair Sultan, Mingjiang Ni, Hao Peng, Xin Zhou, Shulin Wang and Zhongyang Luo. (2017). Design optimization with computational fluid dynamic analysis of -type Stirling engine. Applied Thermal Engineering. 113, 87–102.

[21] Zhonghao Rao , Bin Chen and Jiateng Zhao. (2017). A series of generalized correlations for predicting the thermal conductivity of composite materials packing with artificially designed filler shapes. Applied Thermal Engineering. 120 ,444–452.

[22] Chin-Hsiang Cheng and Yen-Fei Chen. (2017). Numerical simulation of thermal and flow fields inside a 1-kW beta-type Stirling engine. Applied Thermal Engineering. 121, 554–561.

[23] Mohammad H. Ahmadia, Mohammad-Ali Ahmadib and Fathollah Pourfayaza. (2017). Thermal models for analysis of performance of Stirling engine: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 68, 168–184.

[24] Nattakit Tongdeea, Mongkhol Jandakaewb, Teetut Dolwichaia and Chalothorn Thumthaea. (2017).Thermodynamics analysis for optimal geometrical parameters and influence of heat sink temperature of Gamma configuration Stirling engine. International Conference on Applied Energy – ICAE2016. 105, 1782 – 1788.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางที่ ผ.1 ผลการวัดอุณหภูมิ T_1 และ T_2

เวลา (S)	T_1 (K)				T_2 (K)			
	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย
0	301.70	323.30	307.80	310.93	301.90	302.10	301.80	301.93
10	481.90	541.60	543.60	522.37	335.60	324.20	320.50	326.77
20	572.30	656.10	673.70	634.03	365.80	339.30	337.90	347.67
30	630.10	713.60	675.10	672.93	375.70	368.70	344.10	362.83
40	672.60	744.60	723.60	713.60	383.70	387.80	347.60	373.03
50	697.20	764.60	757.40	739.73	402.30	399.40	377.00	392.90
60	716.00	780.90	782.00	759.63	414.40	411.00	400.70	408.70
70	732.30	786.00	774.80	764.37	435.40	432.20	415.30	427.63
80	746.50	794.70	772.00	771.07	451.40	445.30	443.40	446.70
90	758.60	806.10	772.30	779.00	461.70	467.00	464.80	464.50
100	766.10	812.80	787.90	788.93	470.10	480.10	461.70	470.63
110	774.00	813.20	817.60	801.60	481.40	488.20	478.50	482.70
120	782.80	817.20	801.80	800.60	509.30	491.60	496.70	499.20
130	791.30	820.60	794.00	801.97	539.60	509.60	520.60	523.27
140	798.00	818.50	791.70	802.73	551.70	533.10	545.60	543.47
150	802.30	822.70	802.90	809.30	569.10	532.60	559.90	553.87
160	807.60	835.80	802.10	815.17	558.50	534.20	556.00	549.57
170	814.80	859.50	810.60	828.30	547.10	537.90	547.90	544.30
180	819.10	855.80	818.40	831.10	536.30	549.40	556.20	547.30
190	822.50	839.00	825.10	828.87	547.20	554.10	589.10	563.47
200	825.60	838.50	827.80	830.63	553.20	556.00	605.50	571.57
210	828.20	841.30	825.00	831.50	557.00	564.60	608.30	576.63
220	826.50	841.90	819.60	829.33	568.00	562.40	605.00	578.47
230	826.50	841.90	817.50	828.63	571.20	563.80	610.10	581.70
240	828.00	840.00	823.60	830.53	566.70	563.50	610.20	580.13
250	829.30	851.90	828.50	836.57	569.30	566.30	619.70	585.10
260	832.80	853.30	830.30	838.80	566.50	571.10	627.60	588.40
270	833.20	855.60	826.50	838.43	571.00	569.50	643.90	594.80
280	836.50	848.10	829.10	837.90	583.00	565.30	628.30	592.20
290	835.30	854.80	824.70	838.27	575.00	569.00	618.60	587.53
300	835.40	864.10	824.50	841.33	566.20	572.40	625.00	587.87
310	834.90	854.20	832.00	840.37	565.90	575.10	620.50	587.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.1 (ต่อ) ผลการวัดอุณหภูมิ T_1 และ T_2

เวลา (S)	T_1 (K)				T_2 (K)			
	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย
320	836.90	852.00	842.40	843.77	560.70	572.20	630.60	587.83
330	831.70	853.10	836.40	840.40	570.10	573.60	621.70	588.47
340	836.10	851.30	834.10	840.50	567.50	570.50	613.50	583.83
350	842.20	848.30	841.30	843.93	571.40	571.00	601.20	581.20
360	841.30	850.70	838.60	843.53	572.70	577.10	592.50	580.77
370	843.00	850.80	856.90	850.23	580.10	573.40	584.30	579.27
380	838.30	853.60	857.80	849.90	580.70	570.80	586.80	579.43
390	840.00	889.30	844.30	857.87	555.50	575.00	579.00	569.83
400	838.60	871.60	841.90	850.70	543.40	570.00	571.50	561.63
410	843.00	860.60	838.70	847.43	549.10	559.40	566.70	558.40
420	843.20	858.40	826.30	842.63	558.40	560.60	588.40	569.13
430	842.20	855.00	827.30	841.50	561.50	557.70	595.10	571.43
440	844.90	854.20	827.70	842.27	558.60	562.10	594.00	571.57
450	843.50	863.30	829.10	845.30	547.60	558.30	589.40	565.10
460	840.50	856.70	829.40	842.20	550.90	547.40	577.90	558.73
470	842.30	853.50	831.40	842.40	558.20	546.30	578.20	560.90
480	844.00	854.00	846.10	848.03	558.60	559.90	580.30	566.27
490	842.60	852.30	838.30	844.40	559.70	578.90	576.40	571.67
500	840.90	849.60	833.50	841.33	576.40	585.60	577.70	579.90
510	840.40	855.90	838.60	844.97	577.20	587.80	575.40	580.13
520	840.40	854.10	871.10	855.20	576.40	584.10	574.70	578.40
530	841.70	853.50	844.40	846.53	574.90	581.40	574.80	577.03
540	846.00	850.50	829.90	842.13	579.70	580.60	583.90	581.40
550	846.90	851.70	830.80	843.13	579.40	575.00	581.00	578.47
560	843.80	853.80	832.00	843.20	578.10	575.70	582.00	578.60
570	841.20	852.40	836.70	843.43	575.90	578.60	579.00	577.83
580	840.70	858.10	853.00	850.60	572.30	576.50	578.60	575.80
590	841.80	856.60	840.50	846.30	566.80	577.60	580.80	575.07
600	847.90	854.80	839.20	847.30	570.60	575.50	598.00	581.37
610	837.30	855.80	844.70	845.93	570.10	568.80	594.40	577.77
620	834.50	850.50	833.10	839.37	573.60	566.10	593.90	577.87
630	837.70	854.90	833.80	842.13	575.20	567.90	611.60	584.90
640	844.50	852.90	848.40	848.60	573.30	569.80	614.80	585.97
650	840.90	856.70	840.20	845.93	574.30	568.10	600.50	580.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.1 (ต่อ) ผลการวัดอุณหภูมิ T_1 และ T_2

เวลา (S)	T_1 (K)				T_2 (K)			
	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย
660	850.90	858.80	832.20	847.30	574.40	569.80	584.60	576.27
670	845.30	850.60	831.70	842.53	575.70	566.40	584.20	575.43
680	894.20	870.60	834.10	866.30	572.10	567.30	608.30	582.57
690	883.00	855.30	832.60	856.97	569.40	567.00	597.30	577.90
700	883.30	853.70	841.60	859.53	570.80	571.90	611.80	584.83
710	835.40	856.10	837.80	843.10	566.60	576.30	597.00	579.97
720	837.90	847.90	840.40	842.07	576.10	576.10	575.90	576.03
730	846.70	849.70	841.90	846.10	591.00	574.60	573.40	579.67
740	847.30	850.40	848.40	848.70	592.50	571.90	595.30	586.57
750	848.50	854.70	839.00	847.40	585.80	569.90	610.20	588.63
760	856.00	848.20	837.20	847.13	603.70	572.20	601.60	592.50
770	880.60	859.00	836.70	858.77	605.80	562.90	579.00	582.57
780	830.60	862.80	862.40	851.93	589.50	572.60	568.30	576.80
790	833.60	851.40	864.70	849.90	581.70	579.60	569.70	577.00
800	841.70	853.80	850.50	848.67	582.10	580.80	568.90	577.27
810	846.40	850.50	844.60	847.17	586.30	578.20	569.00	577.83
820	841.30	851.40	834.90	842.53	604.70	580.70	565.60	583.67
830	849.70	849.80	830.90	843.47	596.80	573.60	563.80	578.07
840	850.80	850.80	829.60	843.73	604.10	568.00	563.80	578.63
850	844.60	853.60	842.70	846.97	597.50	567.10	567.00	577.20
860	845.00	856.90	835.00	845.63	594.60	566.60	571.20	577.47
870	846.40	854.50	836.00	845.63	592.30	564.90	568.80	575.33
880	844.90	855.20	835.40	845.17	587.40	566.00	566.30	573.23
890	847.00	854.30	835.70	845.67	590.10	566.80	560.50	572.47
900	845.40	854.00	836.50	845.30	589.10	570.70	564.00	574.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.2 ผลการวัดอุณหภูมิ T_3 และ T_4

เวลา (S)	T_3 (K)				T_4 (K)			
	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย
0	302.00	305.00	304.50	303.83	302.00	304.50	305.00	303.83
10	302.75	305.00	304.50	304.08	303.25	304.50	305.00	304.25
20	302.50	305.00	304.50	304.00	303.75	304.50	305.00	304.42
30	302.50	306.00	304.50	304.33	303.50	304.50	305.00	304.33
40	302.50	306.00	304.50	304.33	303.50	305.25	305.00	304.58
50	302.50	306.00	304.50	304.33	303.50	305.25	305.00	304.58
60	302.50	306.00	305.75	304.75	303.50	305.25	305.00	304.58
70	305.00	306.00	305.75	305.58	305.50	305.25	305.00	305.25
80	305.00	306.00	305.75	305.58	305.50	305.25	305.00	305.25
90	305.00	307.25	305.75	306.00	305.50	305.25	307.75	306.17
100	305.00	307.25	305.25	305.83	305.50	305.50	307.75	306.25
110	305.00	307.25	305.25	305.83	305.50	305.50	307.75	306.25
120	305.00	308.75	305.25	306.33	305.50	305.50	308.00	306.33
130	305.00	308.75	306.25	306.67	305.50	306.00	308.00	306.50
140	305.00	309.00	306.25	306.75	305.50	306.00	308.00	306.50
150	305.00	310.50	307.00	307.50	305.50	306.25	308.75	306.83
160	305.00	310.50	307.00	307.50	305.50	306.25	308.75	306.83
170	305.00	310.50	307.00	307.50	305.50	306.25	308.75	306.83
180	305.00	311.00	308.00	308.00	305.50	306.25	308.75	306.83
190	305.00	311.00	308.00	308.00	305.50	306.25	308.75	306.83
200	305.00	311.00	308.00	308.00	305.50	306.25	308.75	306.83
210	305.00	311.00	308.00	308.00	305.50	306.25	308.75	306.83
220	305.00	312.00	309.25	308.75	305.50	307.00	309.75	307.42
230	305.00	312.00	309.25	308.75	305.50	307.00	309.75	307.42
240	308.00	312.00	310.25	310.08	305.50	307.75	309.75	307.67
250	308.00	313.50	310.25	310.58	305.50	307.75	310.50	307.92
260	308.75	313.50	310.25	310.83	305.75	307.75	310.50	308.00
270	309.00	314.50	310.25	311.25	306.50	307.75	310.50	308.25
280	309.50	314.50	311.25	311.75	306.25	307.75	310.50	308.17
290	309.50	314.50	311.25	311.75	306.25	307.75	310.50	308.17
300	310.75	314.50	312.00	312.42	307.00	308.00	310.50	308.50
310	310.75	317.00	312.00	313.25	307.00	308.00	311.75	308.92
320	311.00	317.00	312.50	313.50	307.00	309.00	311.75	309.25
330	311.00	317.00	313.00	313.67	307.00	309.00	311.75	309.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.2 (ต่อ) ผลการวัดอุณหภูมิ T_3 และ T_4

เวลา (S)	T_3 (K)				T_4 (K)			
	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย
340	311.00	317.00	313.00	313.67	307.00	309.00	311.75	309.25
350	312.75	317.00	313.00	314.25	308.00	309.00	311.75	309.58
360	312.75	318.00	313.00	314.58	308.00	309.00	312.25	309.75
370	312.75	318.00	314.25	315.00	308.00	309.75	312.25	310.00
380	312.75	318.00	314.25	315.00	308.00	309.75	312.25	310.00
390	313.75	318.00	314.25	315.33	308.75	309.75	312.25	310.25
400	314.25	319.50	315.00	316.25	308.50	309.75	313.50	310.58
410	314.75	319.50	315.00	316.42	309.25	309.75	313.50	310.83
420	314.75	319.50	315.00	316.42	309.25	309.75	313.50	310.83
430	314.50	319.50	315.75	316.58	309.25	310.75	313.50	311.17
440	314.50	321.00	315.75	317.08	309.25	310.75	313.50	311.17
450	316.25	321.00	315.75	317.67	309.50	310.75	313.50	311.25
460	316.00	321.00	316.25	317.75	309.75	311.25	313.50	311.50
470	316.50	321.00	316.25	317.92	310.50	311.25	313.50	311.75
480	316.50	322.75	317.00	318.75	310.50	311.00	315.00	312.17
490	316.50	322.75	317.00	318.75	310.50	311.00	315.00	312.17
500	317.25	322.75	317.00	319.00	310.50	311.00	315.00	312.17
510	317.75	324.00	317.00	319.58	311.00	311.00	315.50	312.50
520	318.50	324.00	317.75	320.08	311.25	311.75	315.50	312.83
530	318.50	324.75	317.75	320.33	311.25	311.75	316.00	313.00
540	318.50	324.75	317.75	320.33	311.25	311.75	316.00	313.00
550	318.50	325.25	319.25	321.00	311.25	312.25	316.25	313.25
560	319.00	325.25	319.25	321.17	311.75	312.25	316.25	313.42
570	319.25	325.50	319.25	321.33	311.50	312.25	316.25	313.33
580	319.75	325.75	320.00	321.83	312.25	313.00	316.50	313.92
590	319.75	325.75	320.00	321.83	312.25	313.00	316.50	313.92
600	320.25	326.75	320.00	322.33	312.50	313.00	316.75	314.08
610	320.50	327.50	320.00	322.67	312.75	313.00	317.00	314.25
620	320.50	327.50	321.00	323.00	313.00	313.50	317.00	314.50
630	321.50	328.00	321.00	323.50	312.75	313.50	317.75	314.67
640	321.50	328.25	321.00	323.58	312.75	313.50	318.00	314.75
650	321.50	328.25	321.00	323.58	312.75	313.50	318.00	314.75
660	322.00	328.50	322.00	324.17	313.00	314.25	318.50	315.25
670	322.00	328.50	322.00	324.17	313.00	314.25	318.50	315.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.2 (ต่อ) ผลการวัดอุณหภูมิ T_3 และ T_4

เวลา (S)	T_3 (K)				T_4 (K)			
	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย
680	321.25	329.00	322.00	324.08	313.75	314.25	318.25	315.42
690	322.00	330.00	323.00	325.00	314.00	314.25	318.75	315.67
700	322.00	330.25	323.00	325.08	314.00	314.25	319.00	315.75
710	322.00	330.25	323.00	325.08	314.00	314.25	319.00	315.75
720	322.75	330.75	324.25	325.92	314.25	315.75	319.50	316.50
730	323.25	330.75	324.25	326.08	314.50	315.75	319.50	316.58
740	323.25	331.25	325.00	326.50	314.50	316.00	320.00	316.83
750	323.25	331.25	325.00	326.50	315.00	316.00	320.00	317.00
760	323.25	332.00	325.00	326.75	315.00	316.00	320.00	317.00
770	324.00	332.75	325.00	327.25	315.00	316.00	320.50	317.17
780	324.00	332.75	326.00	327.58	315.00	316.25	320.50	317.25
790	324.00	332.75	326.00	327.58	315.00	316.25	320.50	317.25
800	324.00	332.75	326.00	327.58	315.00	316.25	320.50	317.25
810	324.00	333.25	326.00	327.75	315.00	316.25	321.00	317.42
820	325.00	333.50	327.00	328.50	323.00	316.50	321.00	320.17
830	325.00	333.50	327.00	328.50	323.00	316.50	321.00	320.17
840	325.25	334.50	327.00	328.92	316.25	316.50	321.25	318.00
850	326.25	334.50	327.00	329.25	316.00	316.50	321.25	317.92
860	326.25	335.00	327.00	329.42	316.00	316.50	322.00	318.17
870	326.25	335.50	327.00	329.58	317.00	316.50	322.25	318.58
880	326.25	335.50	327.00	329.58	317.00	316.50	322.25	318.58
890	326.25	335.75	328.25	330.08	317.00	318.00	322.50	319.17
900	326.25	336.25	328.50	330.33	316.25	318.00	322.50	318.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เวลา (s)	N (RPM)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
20	0	0	0	0.00
30	0	0	0	0.00
40	0	0	0	0.00
50	0	0	0	0.00
60	0	0	0	0.00
70	0	0	0	0.00
80	0	0	0	0.00
90	0	0	0	0.00
100	0	0	0	0.00
110	0	0	0	0.00
120	0	0	0	0.00
130	0	0	670	670.00
140	0	0	752	752.00
150	0	0	863	863.00
160	583	450	952	661.66
170	750	720	721	730.33
180	780	812	757	783.00
190	812	932	720	821.33
200	832	687	740	753.00
210	780	615	752	715.66
220	850	956	790	865.33
230	739	900	602	747.00
240	811	653	703	688.66
250	843	706	922	823.66
260	850	865	690	801.67
270	865	735	710	770.00
280	901	733	721	785.00
290	831	880	732	814.33
300	843	722	745	770.00
310	848	719	782	783.00
320	925	745	831	833.67
330	894	759	950	867.67
340	877	771	742	796.67
350	894	770	752	805.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3 (ต่อ) ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เวลา (s)	N (RPM)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
360	910	781	741	810.67
370	958	775	732	821.67
380	878	748	726	784.00
390	894	760	695	783.00
400	890	775	789	818.00
410	890	787	779	818.67
420	890	772	763	808.33
430	872	767	759	799.33
440	872	811	721	801.33
450	877	824	703	801.33
460	872	831	698	800.33
470	877	836	675	796.00
480	871	822	662	785.00
490	881	813	666	786.67
500	852	909	673	811.33
510	822	762	664	749.33
520	823	762	686	757.00
530	821	758	664	747.67
540	811	735	711	752.33
550	889	744	690	774.33
560	980	745	790	838.33
570	849	748	790	795.67
580	971	734	771	825.33
590	937	752	750	813.00
600	871	760	698	776.33
610	764	764	699	742.33
620	764	744	644	717.33
630	975	752	RPM	863.50
640	856	755	668	759.67
650	759	753	683	731.67
660	769	758	672	733.00
670	759	740	670	723.00
680	777	743	676	732.00
690	776	739	670	728.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3 (ต่อ) ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เวลา (s)	N (RPM)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
700	777	734	680	730.33
710	777	724	690	730.33
720	774.1	693	664	710.37
730	777.1	691	660	709.37
740	780	679	652	703.67
750	780	673	650	701.00
760	762	673	645	693.33
770	769	682	635	695.33
780	764	681	632	692.33
790	762	681	630	691.00
800	758	663	629	683.33
810	764	657	624	681.67
820	772	664	620	685.33
830	772	649	613	678.00
840	748	650	607	668.33
850	760	645	603	669.33
860	722	652	642	672.00
870	793	648	699	713.33
880	747	647	602	665.33
890	756	644	506	635.33
900	752	642	512	635.33

ตารางที่ ผ.4 ค่าอุณหภูมิ T_2, T_3 และ T_4 จากการ simulation

Time (s)	T_2 (K)	T_3 (K)	T_4 (K)
0	302.80	302.80	302.80
10	307.74	302.79	302.38
20	334.67	302.79	302.37
30	370.32	302.79	302.35
40	401.24	302.81	302.35
50	426.87	302.88	302.36
60	447.91	303.02	302.38
70	465.16	303.21	302.41
80	478.45	303.45	302.47
90	489.07	303.73	302.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิ T_2, T_3 และ T_4 จากการ simulation

Time (s)	T_2 (K)	T_3 (K)	T_4 (K)
100	498.33	304.05	302.66
110	507.01	304.40	302.77
120	515.29	304.78	302.91
130	522.08	305.17	303.07
140	527.72	305.58	303.24
150	532.72	306.01	303.43
160	537.73	306.45	303.60
170	542.98	306.90	303.80
180	548.71	307.36	304.02
190	553.84	307.83	304.21
200	557.87	308.31	304.41
210	561.40	308.80	304.63
220	564.54	309.30	304.86
230	567.06	309.81	305.09
240	569.31	310.32	305.31
250	571.66	310.83	305.58
260	574.38	311.35	305.77
270	577.05	311.87	305.98
280	579.27	312.39	306.20
290	581.13	312.91	306.42
300	582.86	313.43	306.66
310	584.69	313.96	306.90
320	586.35	314.48	307.11
330	588.00	315.00	307.34
340	589.19	315.52	307.62
350	590.28	316.04	307.82
360	591.61	316.56	308.04
370	592.96	317.07	308.28
380	594.71	317.59	308.52
390	596.40	318.10	308.71
400	598.30	318.60	309.00
410	599.23	319.11	309.18
420	599.47	319.61	309.44
430	599.31	320.11	309.60
440	599.22	320.60	309.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิ T_2, T_3 และ T_4 จากการ simulation

Time (s)	T_2 (K)	T_3 (K)	T_4 (K)
450	599.46	321.09	310.03
460	600.03	321.58	310.24
470	600.34	322.06	310.44
480	600.71	322.53	310.69
490	601.53	323.00	310.86
500	601.93	323.46	311.11
510	601.98	323.92	311.31
530	603.98	324.82	311.51
540	604.33	325.27	311.74
550	604.04	325.70	311.90
560	603.95	326.14	312.09
570	604.05	326.57	312.27
580	604.37	326.99	312.54
590	605.24	327.41	312.65
600	605.67	327.82	312.83
610	605.98	328.23	313.01
620	606.02	328.63	313.20
630	605.55	329.03	313.49
640	605.54	329.43	313.57
650	606.23	329.81	313.76
660	606.67	330.20	314.03
670	606.96	330.58	314.12
680	607.26	330.95	314.40
690	609.33	331.32	314.49
700	610.56	331.68	314.66
710	611.08	332.04	314.82
720	610.05	332.40	314.97
730	609.07	332.76	315.33
740	608.96	333.11	315.33
750	609.28	333.45	315.79
760	609.47	333.79	315.91
770	609.80	334.13	315.97
780	610.98	334.46	316.06
790	611.41	334.79	316.28
800	611.35	335.11	316.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิ T_2, T_3 และ T_4 จากการ simulation

Time (s)	T_2 (K)	T_3 (K)	T_4 (K)
810	611.19	335.43	316.58
820	610.90	335.74	316.71
830	610.34	336.06	316.83
840	610.00	336.36	317.12
850	609.93	336.67	317.22
860	610.19	336.96	317.31
870	610.33	337.26	317.48
880	610.40	337.55	317.60
890	610.47	337.83	317.72
900	610.50	338.10	317.74

ตารางที่ ผ.5 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ณ จุด T_H และ T_C กับเวลา

Time [s]	Temperature (Fluid) [K] (T_H)	Temperature (Fluid) [K] (T_C)	Time [s]	Temperature (Fluid) [K] (T_H)	Temperature (Fluid) [K] (T_C)
0	300.00	300.00	92	696.96	302.75
2	319.21	302.77	94	699.07	302.75
4	348.47	302.80	96	701.19	302.75
6	380.20	302.80	98	703.31	302.75
8	411.67	302.80	100	705.39	302.75
10	443.45	302.79	102	707.85	302.75
12	468.23	302.79	104	710.20	302.75
14	487.13	302.79	106	712.69	302.75
16	505.29	302.79	108	715.30	302.75
18	526.75	302.79	110	717.89	302.75
20	544.93	302.79	112	719.27	302.75
22	557.57	302.79	114	719.91	302.75
24	565.82	302.79	116	720.42	302.75
26	573.20	302.79	118	720.83	302.75
28	580.29	302.78	120	721.25	302.75
30	587.92	302.78	122	721.84	302.75
32	594.98	302.78	124	722.55	302.75
34	602.12	302.78	126	723.27	302.75
36	609.24	302.78	128	723.98	302.75
38	616.35	302.78	130	724.70	302.75
40	623.43	302.78	132	725.36	302.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5 (ต่อ) อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ณ จุด T_H และ T_C กับเวลา

Time [s]	Temperature (Fluid) [K] (T_H)	Temperature (Fluid) [K] (T_C)	Time [s]	Temperature (Fluid) [K] (T_H)	Temperature (Fluid) [K] (T_C)
42	629.41	302.78	134	726.02	302.75
44	634.57	302.77	136	726.64	302.75
46	639.52	302.77	138	727.26	302.75
48	644.36	302.77	140	727.85	302.75
50	649.28	302.77	142	729.55	302.75
52	653.57	302.77	144	730.94	302.75
54	657.55	302.77	146	732.44	302.75
56	661.40	302.77	148	733.87	302.76
58	665.25	302.77	150	735.28	302.76
60	669.09	302.76	152	736.68	302.76
62	671.73	302.76	154	737.96	302.76
64	673.43	302.76	156	739.31	302.76
66	674.81	302.76	158	740.61	302.76
68	676.03	302.76	160	741.95	302.77
70	677.42	302.76	162	743.31	302.77
72	679.06	302.76	164	745.74	302.77
74	680.74	302.76	166	748.13	302.77
76	682.44	302.76	168	750.55	302.77
78	684.13	302.75	170	752.98	302.78
80	685.84	302.75	172	754.61	302.78
82	687.62	302.75	174	755.63	302.78
84	689.48	302.75	176	756.53	302.78
86	691.34	302.75	178	757.41	302.79
88	693.18	302.75	180	753.91	302.79
90	695.03	302.75	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายคนึงชาติ แสนยศ

วัน เดือน ปีเกิด 12 กรกฎาคม 2534

ที่อยู่ปัจจุบัน 91/2 หมู่ที่ 1 ต.นนทรีย์ อ.บ่อไร่ จ.ตราด 23140

ประวัติการศึกษา (2557) วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 2.54
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
(2560) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.50
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทุนการศึกษาที่ได้รับ -

ผลงานทางวิชาการ

1. Design and Fabrication of Gamma-Type Stirling Engine on Parabolic Dish of Solar Concentrator by a Compression Ratio Method, AMM, vol.851, pp 383-388.
2. Portable Laser 1D Barcode Scanner for Material Identification, KEM (Submitted)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้