

การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



นาย จิตรกร ศรีสายชล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-53-2866-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL STIRLING ENGINE

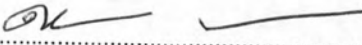
Mr. Jittakorn Srisaichon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2006

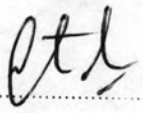
490061

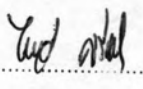
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
โดย นาย จิตรกร ศรีสายชล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพบุลย์ ศรีภคการ

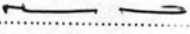
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพบุลย์ ศรีภคการ)


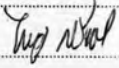

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย)

จิตรกร ศรีสายชล : การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (A DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL STIRLING ENGINE) อาจารย์ที่ปรึกษา : (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพบุลย์ ศรีภาคกร ; 112 หน้า. ISBN 974-53-2866-9

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบอัลฟา โดยดัดแปลงจากเครื่องอัดอากาศแบบสองสูบรูปตัววี โดยใช้วิธีสมการเชิงประจักษ์ วิธี Schmidt analysis และ วิธี Adiabatic เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานเบื้องต้น พร้อมด้วยพิจารณาถึงปัญหาหลักในการนำเครื่องอัดอากาศมาปรับใช้ ได้แก่การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ฮีตเตอร์ คูลเลอร์ และรีเจนเนอเรเตอร์ การปรับลดความเสียดทานในระบบ รวมถึงการซีลระบบเพื่อการทำงานที่สูงกว่าการทำงานที่ความดันบรรยากาศ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ดัดแปลงขึ้นได้ถูกทดสอบที่ความดันบรรยากาศ โดยพบว่าไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง ใดๆก็ดี การทดสอบก็ได้พบว่า การทำนายโดยใช้วิธี Schmidt และ วิธี Adiabatic ให้แนวโน้มที่ดีในการประเมินกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ และรีเจนเนอเรเตอร์มีผลสำคัญต่อค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

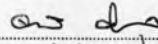
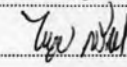
4570251221 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : STRILING ENGINE / REGENERATOR

JITTAKORN SRISAICHON : A DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL STIRLING ENGINE. THESIS ADVISOR : ASST PROF DR. PAIBOON SRIPAKAGORN ., 112 pp. ISBN 974-53-2866-9

This is an attempt to build a Stirling engine from standard parts of an air compressor unit. Emperical formula together with the Schmidt and Adiabatic analysis have been employed for the initial performance estimation. Outstanding problems regarding the adoption of the air compressor include the design and construction of the heat exchangers: heater, cooler and regenerator, techniques to reduce the running friction and the sealing of the pressurized system. The engine still can not overcome the friction. Testings on the engine indicate that combination of Schmidt and Adiabatic analysis and method of Iwamoto could lead to a decent assessment of the indicated power and the running speed of the engine.

Department Mechanical Engineering
Field of study Mechanical Engineering
Academic year 2006

Student's signature 
Adviser's signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ขอมอบเป็นกตัญญูบูชาแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพบูรณ์ ศรีภักดากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ให้ความกรุณาในการสั่งสอน และถ่ายทอดความรู้ต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดทั้งวิธีคิดที่ละเอียดรอบคอบ และเป็นขั้นตอนทั้งในแง่ของการศึกษาและการดำเนินชีวิต ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สดภาพร สุปรีชากร ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและยืมเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเพื่อนๆร่วมหลักสูตรระดับปริญญาโท สำหรับกำลังใจ และความช่วยเหลือที่มีให้ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ คุณสุบิน ชันตี คุณนิสิต ไสยลักษณ์ คุณโกวิท โกพล คุณธนพร เสาวรัตน์ชัย และครูปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกคน ที่ได้ให้คำแนะนำในการยืม และใช้เครื่องมือในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่ให้การสนับสนุนการศึกษา จนกระทั่งผู้ทำวิทยานิพนธ์สำเร็จการศึกษา สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณ มารดา ผู้ซึ่งเสียสละ และทุ่มเททุกอย่างเพื่อการศึกษาของบุตรมาโดยตลอด ความดีอันใดที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบเป็นกตัญญูบูชาแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
รายการสัญลักษณ์.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	5
2.1 แบบจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Isothermal (Ideal Isothermal Stirling cycle).....	5
2.2 แบบจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Adiabatic (Pseudo Stirling cycle).....	9
2.3 แบบจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงจักรแบบ Isothermal – Harmonic motion (Schmidt analysis).....	13
2.4 แบบจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Adiabatic – Harmonic motion (Adiabatic analysis).....	13
2.5 กำลังที่ใช้อธิบายการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	13
2.6 การหากำลังของเครื่องยนต์โดยใช้สมการจากการทดลอง.....	14
2.7 การเปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลจากการทดลอง.....	14
2.7.1 ผลการทดลอง.....	15
2.7.2 ผลจากการคำนวณด้วยวัฏจักร Isothermal.....	15
2.7.3 ผลการคำนวณด้วยวัฏจักร Adiabatic.....	17
2.7.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Schmidt analysis และ วิธี Adiabatic analysis และการแก้สมการ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	17
2.7.5 ผลการคำนวณด้วยวิธีของ Beale.....	17
2.7.6 ผลจากการคำนวณด้วยสมการของ West.....	17
2.7.7 ผลจากการคำนวณด้วยสมการของ Iwamoto.....	17

	หน้า
2.8 สรุปความสามารถในการประเมินสมรรถนะด้วยวิธีต่างๆ.....	19
2.9 ขั้นตอนการออกแบบทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	21
บทที่ 3 การออกแบบส่วนประกอบ.....	25
3.1 การออกแบบฮีทเตอร์.....	25
3.2 การออกแบบคูลเลอร์.....	27
3.3 การออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์.....	28
3.4 การดัดแปลงเครื่องอัดอากาศ.....	28
3.4.1 แหวนลูกสูบ.....	28
3.4.2 การใช้แผ่นสะท้อนรังสีความร้อน.....	29
3.4.3 การซีลอากาศและท่อจ่ายลม.....	30
3.4.4 การติดตั้งล้อช่วยแรง.....	33
3.5 ปัญหาที่พบในการผลิตและการประกอบเครื่องยนต์.....	33
3.6 การประเมินหากำลังของเครื่องยนต์ที่ได้สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	36
บทที่ 4 การทดลอง.....	38
4.1 วัตถุประสงค์และแนวคิด.....	38
4.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	38
4.3 วิธีการทดลอง.....	39
4.4 ผลการทดลอง.....	40
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	43
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 บทสรุป.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
รายการอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก การเคลื่อนที่ของลูกสูบแบบฮาร์มอนิก (Harmonic motion).....	51
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์วัฏจักรแบบ Isothermal – Harmonic motion (Schmidt analysis).....	55

	หน้า
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์วิถีจักรแบบ Adiabatic – Harmonic motion (Adiabatic analysis).....	62
ภาคผนวก ง การป้อนข้อมูลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของ Urieli เพื่อทำนายสมรรถนะในหัวข้อ 2.7.4.....	67
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์กำลังและความเร็วรอบโดยวิธีของ Iwamoto.....	70
ภาคผนวก ฉ การทดลองเพื่อประเมินแรงเสียดทานในเครื่องยนต์.....	77
ภาคผนวก ช การวัดอุณหภูมิของแก๊สในกระบอกสูบ.....	94
ภาคผนวก ซ ทิศทางการหมุนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	95
ภาคผนวก ฌ รูปถ่ายชุดทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	99

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 แสดงตัวแปรและหน่วยที่ใช้กับสมการของ Beale และ West.....	15
ตารางที่ 2-2 รายละเอียดของเครื่องยนต์ของ Kagawa.....	16
ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบผลการประเมินเครื่องยนต์สเตอร์ลิงของ Kagawa จากวิธีต่างๆที่ความเร็ว 1250 rpm.....	19
ตารางที่ 3-1 สภาพสะท้อนของวัสดุบางชนิด.....	30
ตารางที่ 3-2 รายละเอียดของเครื่องยนต์ที่ดัดแปลงจากเครื่องอัดอากาศ.....	35
ตารางที่ 4-1 การเปลี่ยนแปลงความดันใช้งานที่มีผลต่อกำลังเครื่องยนต์.....	36
ตารางที่ 4-2 รายละเอียดของอุปกรณ์อื่นๆที่ต้องใช้ในการทดลอง.....	37
ตารางที่ 5-1 รายละเอียดของเครื่องยนต์ที่ใช้ทดลอง.....	42
ตารางที่ ๖-1 รายละเอียดเครื่องยนต์ที่ Iwamoto นำมาใช้สร้างความสัมพันธ์ในรูปที่ ๖2 และรูปที่ ๖3.....	68
ตารางที่ ๖-2 รายละเอียดของเครื่องยนต์ ที่นำมาคำนวณหา $L_{S,max} * n_{opt} *$ และ S^* เพื่อนำมาใช้ เปรียบเทียบกับ รูปที่ ๖2 และรูปที่ ๖3.....	70
ตารางที่ ๖-3 เปรียบเทียบผลการคำนวณโดยวิธีของ West กับวิธีของ Iwamoto.....	73
ตารางที่ ๗-1 ผลการทดลองหาแรงเสียดทานของเครื่องอัดอากาศในขณะหยุดนิ่ง.....	74
ตารางที่ ๗-2 กำลังเสียดทานของเครื่องอัดอากาศขณะหยุดนิ่งที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	76
ตารางที่ ๗-3 ผลการทดลองหาแรงเสียดทานจากความฝืดของเครื่องอัดอากาศขณะหมุน.....	77
ตารางที่ ๗-4 กำลังเสียดทานจากความฝืดของเครื่องอัดอากาศขณะหมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	77
ตารางที่ ๗-5 ผลการทดลองหาแรงเสียดทานจากแรงดันการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนเมื่อใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 1 โดยเปิดท่ออากาศด้านฮีเตอร์.....	79
ตารางที่ ๗-6 ผลการทดลองหาแรงเสียดทานจากแรงดันการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนเมื่อใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 1 โดยเปิดท่ออากาศด้านคูลเลอร์.....	79
ตารางที่ ๗-7 กำลังเสียดทานจากการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้รีเจน เนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 1.....	80
ตารางที่ ๗-8 ผลการทดลองหาแรงเสียดทานจากแรงดันการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนเมื่อใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.93 โดยเปิดท่ออากาศด้านฮีเตอร์.....	80
ตารางที่ ๗-9 ผลการทดลองหาแรงเสียดทานจากแรงดันการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนเมื่อใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.93 โดยเปิดท่ออากาศด้านคูลเลอร์.....	81

	หน้า
ตารางที่ ฉ-10 กำลังเสียดทานจากการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.93.....	81
ตารางที่ ฉ-11 ผลการทดสอบหาแรงเสียดทานจากแรงต้านการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.9 โดยเปิดท่ออากาศด้านฮีตเตอร์.....	82
ตารางที่ ฉ-12 ผลการทดสอบหาแรงเสียดทานจากแรงต้านการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.9 โดยเปิดท่ออากาศด้านคูลเลอร์.....	82
ตารางที่ ฉ-13 กำลังเสียดทานจากการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.9.....	83
ตารางที่ ฉ-14 ผลการทดสอบเมื่อไม่มีการให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ โดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 1.....	84
ตารางที่ ฉ-15 กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อไม่มีการให้ความร้อนโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 1.....	84
ตารางที่ ฉ-16 ผลการทดสอบเมื่อให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ โดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 1.....	85
ตารางที่ ฉ-17 กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อให้ความร้อนโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 1.....	85
ตารางที่ ฉ-18 ผลการทดสอบเมื่อไม่มีการให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ โดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.93.....	86
ตารางที่ ฉ-19 กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อไม่มีการให้ความร้อนโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.93.....	86
ตารางที่ ฉ-20 ผลการทดสอบเมื่อให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ โดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.93.....	87
ตารางที่ ฉ-21 กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อให้ความร้อนโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.93.....	87
ตารางที่ ฉ-22 ผลการทดสอบเมื่อไม่มีการให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ โดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.9.....	88
ตารางที่ ฉ-23 กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อไม่มีการให้ความร้อนโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.9.....	88
ตารางที่ ฉ-24 ผลการทดสอบเมื่อให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ โดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 0.9.....	89
ตารางที่ ข -1 ผลการวัดอุณหภูมิของฮีตเตอร์แบบใช้เปลวไฟให้ความร้อน.....	94

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1-1 เครื่องยนต์ที่ โรเบิร์ต สเตอร์ลิง ประดิษฐ์ขึ้นเมื่อปี 1816.....	1
รูปที่ 1-2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบอัลฟา.....	2
รูปที่ 1-3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบตา.....	2
รูปที่ 1-4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา.....	2
รูปที่ 2-1 การเปลี่ยนแปลงความดันต่อปริมาตร ($p - V$ diagram) ของวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Isothermal.....	5
รูปที่ 2-2 การทำงานของวัฏจักรสเตอร์ลิงกับการวางตัวของลูกสูบแบบอัลฟา.....	6
รูปที่ 2-3 แนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนและงานแบบไร้หน่วย เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการอัดเชิงปริมาตรสำหรับวัฏจักรแบบ Isothermal.....	8
รูปที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงความดันต่อปริมาตร ($p - V$ diagram) ของวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Adiabatic.....	9
รูปที่ 2-5 แนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนและงานแบบไร้หน่วย เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการอัดเชิงปริมาตรสำหรับวัฏจักร แบบ Adiabatic.....	11
รูปที่ 2-6 การแบ่งปริมาตรของระบบ และการกระจายตัวของอุณหภูมิ สำหรับการวิเคราะห์แบบ Isothermal.....	12
รูปที่ 2-7 การแบ่งปริมาตรของระบบ และการกระจายตัวของอุณหภูมิ สำหรับการวิเคราะห์แบบ Adiabatic.....	13
รูปที่ 2-8 ความสัมพันธ์ของกำลังและความเร็วรอบ เพื่อเปรียบเทียบผลการประเมินเครื่องยนต์สเตอร์ลิงของ Kagawa จากวิธีต่างๆ.....	19
รูปที่ 2-9 ลำดับการส่งผ่านพลังงานในระดับการคำนวณต่างๆ.....	20
รูปที่ 3-1 ส่วนประกอบของเครื่องอัดอากาศ.....	25
รูปที่ 3-2 ฮีทเตอร์แบบใช้เปลวไฟเผาให้ความร้อน.....	25
รูปที่ 3-3 ฮีทเตอร์แบบใช้แกนขดลวดไฟฟ้ายึดกับแท่งไมกา.....	26
รูปที่ 3-4 ฮีทเตอร์แบบมีขดลวดไฟฟ้าอยู่ในแท่งเซรามิกส์.....	27
รูปที่ 3-5 คูลเลอร์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ.....	27
รูปที่ 3-6 คูลเลอร์ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ.....	27
รูปที่ 3-7 ทอร์เจนเนอเรเตอร์ที่มีแผ่นตาข่ายสแตนเลสบรรจุอยู่ใน.....	28
รูปที่ 3-8 แหวนเทฟลอนใช้ซีลอากาศที่ลูกสูบ.....	29
รูปที่ 3-9 วิธีลดความร้อนที่ลูกสูบของ Halit Karabulut.....	29
รูปที่ 3-10 การติดตั้งอุปกรณ์กันรังสีความร้อน.....	30

	หน้า
รูปที่ 3-11 การซีลที่ฝาปิดฮีทเตอร์.....	31
รูปที่ 3-12 การซีลสายเทอร์โมคัปเปิล.....	31
รูปที่ 3-13 การซีลที่รูสวมเพลลาข้อเหวี่ยง.....	32
รูปที่ 3-14 วิธีการต่อเพลลาข้อเหวี่ยง.....	34
รูปที่ 3-15 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ดัดแปลงจากเครื่องอัดอากาศ.....	34
รูปที่ 4-1 การติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	38
รูปที่ ก-1 เปรียบเทียบลักษณะของ p - V diagram เมื่อคำนึงถึงผลของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก.....	50
รูปที่ ก-2 กลไกแบบ Slider-crank.....	50
รูปที่ ก-3 เปรียบเทียบระหว่างการเคลื่อนที่จริงของกลไกแบบ Slider-Crank และการประมาณการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก.....	51
รูปที่ ก-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรอัดตัวและปริมาตรขยายตัวที่มุม θ ต่างๆ.....	52
รูปที่ ข-1 การแบ่งปริมาตรของระบบ และการกระจายตัวของอุณหภูมิ สำหรับการวิเคราะห์แบบ Isothermal.....	54
รูปที่ ข-2 การกระจายตัวของอุณหภูมิในรีเจนเนอเรเตอร์.....	55
รูปที่ ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (p) กับมุม ϕ	59
รูปที่ ค-1 การแบ่งปริมาตรของระบบ และการกระจายตัวของอุณหภูมิ สำหรับการวิเคราะห์แบบ Adiabatic.....	61
รูปที่ ค-2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในปริมาตร c และ k	62
รูปที่ ง-1 การเปลี่ยนแปลงความดันต่อปริมาตร (p - V Diagram).....	68
รูปที่ จ-1 ความสัมพันธ์ของกำลังขาออกและกลุ่มตัวแปร $p_m n V_0$	69
รูปที่ จ-2 ความสัมพันธ์ของ Nondimensional output power กับ Nondimensional engine speed จากเครื่องยนต์ ในตาราง จ1.....	71
รูปที่ จ-3 ความสัมพันธ์ของ Nondimensional engine speed กับ Nondimensional engine specification จากเครื่องยนต์ ในตาราง จ.....	71
รูปที่ จ-4 ความสัมพันธ์ของ Nondimensional output power กับ Nondimensional engine speed โดยเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากตาราง จ1 และตาราง จ2.....	73

	หน้า
รูปที่ จ-5 ความสัมพันธ์ของ Nondimensional engine speed กับ Nondimensional engine specification โดยเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากตาราง จ1 และตาราง จ2.....	73
รูปที่ ฉ-1 วิธีการหาแรงเสียดทานของเครื่องอัดอากาศในขณะหยุดนิ่ง.....	77
รูปที่ ฉ-2 แรงที่กระทำกับเพลาช้อเหวี่ยง.....	78
รูปที่ ฉ-3 วิธีการหาแรงเสียดทานจากความฝืดของเครื่องอัดอากาศขณะหมุน.....	80
รูปที่ ฉ-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเสียดทานของเครื่องอัดอากาศในขณะหยุดนิ่งและในขณะหมุน.....	82
รูปที่ ฉ-5 วิธีการหาแรงเสียดทานจากแรงต้านการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	82
รูปที่ ฉ-6 กราฟของกำลังเสียดทานจากการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน = 1, 0.93 และ 0.9.....	87
รูปที่ ช-1 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	94
รูปที่ ช-1 ตำแหน่งของลูกสูบทุก 45° ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบอัลฟา.....	95
รูปที่ ฉ-1 ชุดทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	97
รูปที่ ฉ-2 ท่ออากาศ.....	97
รูปที่ ฉ-3 แบร์ริง.....	97
รูปที่ ฉ-4 รีเจนเนอเรเตอร์.....	97
รูปที่ ฉ-5 ฮีทเตอร์.....	98
รูปที่ ฉ-6 คูลเลอร์.....	98
รูปที่ ฉ-5 เครื่องอัดอากาศ.....	98
รูปที่ ฉ-7 มอเตอร์ไฟฟ้า.....	98

รายการสัญลักษณ์

A_p	พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ, m^2
A_r	พื้นที่หน้าตัดของรีเจนเนอเรเตอร์, m^2
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะเมื่อความดันคงที่, $J/kg \cdot K$
C_v	ค่าความร้อนจำเพาะเมื่อปริมาตรคงที่, $J/kg \cdot K$
F	ค่าคงที่ของ West
k	อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ, C_p/C_v
K	อัตราส่วนของปริมาตรกระจัด, V_{sc}/V_{se}
l	ความยาวก้านสูบ, m
L_s^*	กำลังขาออกแบบไม่มีหน่วย
m	มวลของแก๊ส, kg
M	มวลของแก๊สรวมทั้งระบบ, kg
m_c	มวลของแก๊สที่ปริมาตรอัดตัว, kg
m_e	มวลของแก๊สที่ปริมาตรขยายตัว, kg
m_h	มวลของแก๊สที่ฮีทเตอร์, kg
m_k	มวลของแก๊สที่คูลเลอร์, kg
m_r	มวลของแก๊สที่รีเจนเนอเรเตอร์, kg
n	ความเร็วรอบ, rps
P	กำลังบ่งชี้, W
p	ความดัน, Pa
P^*	ความดันแบบไม่มีหน่วย
P_B	กำลังขาออกที่เพลลา, W
p_{lim}	ความดันเฉลี่ยสูงสุดที่ออกแบบใช้งาน, Pa
p_m	ความดันเฉลี่ย, Pa
p_{max}	ความดันสูงสุดของระบบ, Pa
p_{min}	ความดันต่ำสุดของระบบ, Pa
Q_h	ความร้อนที่ฮีทเตอร์, W
Q_{in}	ความร้อนไหลเข้าสู่ระบบ, W
Q_k	ความร้อนที่คูลเลอร์, W
Q_{out}	ความร้อนไหลออกจากระบบ, W
Q_r	ความร้อนที่รีเจนเนอเรเตอร์, W
R	ค่าคงที่ของแก๊ส, $J/kg \cdot K$
r	รัศมีของเพลลาข้อเหวี่ยง, m
S^*	Nondimensional engine specification สำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีของ Iwamoto

T^*	อุณหภูมิแบบไม่มีหน่วย
T_c	อุณหภูมิที่ปริมาตรอัดตัว, K
T_e	อุณหภูมิที่ปริมาตรขยายตัว, K
T_H	อุณหภูมิที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ, K
T_h	อุณหภูมิที่ฮีทเตอร์, K
T_k	อุณหภูมิที่คูเลออร์, K
T_L	อุณหภูมิที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ, K
T_{lim}	อุณหภูมิสูงสุดของระบบใช้งานที่ p_{lim} , K
T_r	อุณหภูมิเฉลี่ยที่รีเจนเนอเรเตอร์, K
V	ปริมาตร, m^3
V_c	ปริมาตรด้านอัดตัว, m^3
V_{clc}	ปริมาตรช่องว่างด้านอัดตัว
V_{cle}	ปริมาตรช่องว่างด้านขยายตัว
V_d	ปริมาตรคงที่(Dead volume), m^3
V_e	ปริมาตรด้านขยายตัว, m^3
V_h	ปริมาตรของฮีทเตอร์, m^3
V_k	ปริมาตรของคูเลออร์, m^3
V_{max}	ปริมาตรสูงสุดของระบบ, m^3
V_{min}	ปริมาตรต่ำสุดของระบบ, m^3
V_r	ปริมาตรของรีเจนเนอเรเตอร์, m^3
V_{sc}	ปริมาตรกระจัดด้านอัดตัว, m^3
V_{se}	ปริมาตรกระจัดด้านขยายตัว, m^3
W	งาน, J
W_c	งานบ่งชี้ที่เกิดจากปริมาตรอัดตัว, J
W_e	งานบ่งชี้ที่เกิดจากปริมาตรขยายตัว, J
W_n	งานแบบไม่มีหน่วย
W_s	แรงบิดที่เพลลา, J
W_s^*	งานแบบไม่มีหน่วย สำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีของ Iwamoto
W_{tot}	งานบ่งชี้สุทธิตลอดวัฏจักร, J
x	ระยะการกระจัดเชิงเส้น, m
X	อัตราส่วนของปริมาตรคงที่กับปริมาตรกระจัดด้านขยายตัว, V_d/V_{se}
θ	มุมเพลลาข้อเหวี่ยง, rad
α	มุมที่ปริมาตรขยายตัวนำหน้าปริมาตรอัดตัว, rad
β_N	ค่าคงที่ของ Beale
ε	ประสิทธิภาพของรีเจนเนอเรเตอร์

τ	อัตราส่วนของอุณหภูมิ
\mathcal{K}_v	อัตราส่วนการอัดเชิงปริมาตร
η_{th}	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
ν	ความหนืดของสารทำงาน, (m ² /s)
η_m	ประสิทธิภาพเชิงกล

อักษรห้อย

ck	ช่วงรอยต่อของปริมาตรอัดตัวกับคูเลออร์
he	ช่วงรอยต่อของฮีตเตอร์กับปริมาตรขยายตัว
i	ทิศทางการไหลเข้าสู่ระบบ
kr	ช่วงรอยต่อของคูเลออร์กับรีเจเนอเรเตอร์
o	ทิศทางการไหลออกจากระบบ
rh	ช่วงรอยต่อของรีเจเนอเรเตอร์กับฮีตเตอร์