



การศึกษากฎโลกการสูญสิ้นของเครื่องเขนแต่ละเครื่องแบบมัดด้ายจุดทอทอผ้าปักลาย

นางกฤษณฉิน ฉันทานันต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



246296

600251312

การศึกษากลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลาง



นาย กฤษลิน ถมยาบัตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 1 7 0 2 1 2 7 2 1

THE STUDY OF LOSS MECHANISM IN THE STIRLING ENGINE WITH MODERATE
TEMPERATURE DIFFERENCE

Mr. Krissalin Tomyabatra

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษากลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบ
ผลต่างอุณหภูมิปานกลาง

โดย

นาย กฤษลิน ฅมยาบัตร

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังคิร ศิริภาคาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังคิร ศิริภาคาร)

..... กรรมการ
(ดร. ณัฐเดช เพ็ญวงวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรรานนท์)

กฤษลิน ถมยาบัตร : การศึกษากลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่าง
อุณหภูมิปานกลาง (THE STUDY OF LOSS MECHANISM IN THE STIRLING
ENGINE WITH MODERATE TEMPERATURE DIFFERENCE)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. อังศิริ ศรีภคากร, 107 หน้า.

246296

การศึกษานี้พิจารณาการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลาง (MDSE) เพื่อระบุการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์ ด้วยวิธีการประเมินย้อนกลับเพื่อนำไปหาการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ ผลการประเมินกับเครื่องฟัดกำลังขาออก 100 W พบว่า การสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ และความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ เป็นการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์ ทำให้เล็งเห็นแนวทางในการปรับปรุง 3 ส่วน คือ การเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของ Taguchi, การเปลี่ยนวัสดุแหวนลูกสูบกำลัง และการเปลี่ยนสารทำงานจากอากาศเป็นฮีเลียม ผลการปรับปรุงเครื่องยนต์พบว่า ลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่เหมาะสมที่สุดให้กำลังขาออกสูงสุดเพิ่มขึ้น 35% สำหรับการเปลี่ยนวัสดุแหวนลูกสูบกำลังพบว่า ให้อายุการใช้งานนานขึ้น แต่ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริง สำหรับการเปลี่ยนสารทำงานจากอากาศเป็นฮีเลียมพบว่า กำลังขาออกมีค่าต่ำลง สันนิษฐานว่าเนื่องจาก ผลของค่าความเฉื่อยของเครื่องยนต์มีมากเกินไปทำให้เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้ตามความเร็วรอบที่เหมาะสม สำหรับการใช้อีเลียมเป็นสารทำงาน ผลการเปรียบเทียบการสูญเสียของ MDSE กับการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิสูง (HDSE) และต่ำ (LDSE) โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบของ Iwamoto, S. พบว่า วิธีการของ Iwamoto, S. มีข้อจำกัดที่ไม่ได้คำนึงผลของความดันที่แตกต่างกันของเครื่องยนต์ที่ใช้เปรียบเทียบ ดังนั้นได้ปรับใช้วิธีการเปรียบเทียบของ Prieto, J.L. ในการเปรียบเทียบการสูญเสียแทน ผลการเปรียบเทียบแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของเทอมการสูญเสียแบบไร้มิติจาก LDSE MDSE และ HDSE ตามลำดับและพบว่า เครื่องยนต์ MDSE ที่มีอยู่ มีค่าการสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้ใกล้เคียงกับค่าของ HDSE ซึ่งบ่งชี้ว่า MDSE ที่มีอยู่มีการออกแบบระบบทางความร้อนไม่เหมาะสม

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกลลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกลลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2553

5170212721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : STIRLING ENGINE / INTERMEDIATE TEMPERATURE / LOSS

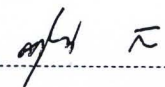
KRISSALIN TOMYABATRA : THE STUDY OF LOSS MECHANISM IN THE
STIRLING ENGINE WITH MODERATE TEMPERATURE DIFFERENCE.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ANGKEE SRIPAKAGORN, Ph.D., 107 pp.

246296

The present work investigates the loss mechanism in a Stirling engine with moderate temperature difference (MDSE) in order to identify the major loss mechanism. The result for the 100-W Beta-type Stirling engine indicated that the heat loss to the environment and the heat dissipated on the hot side are the major loss mechanisms. The finding indicates three improvements to be performed to the engine: to optimize the regenerator via Taguchi's method, to change the material for the piston ring and to change the working fluid from air to helium. The optimization result on the regenerator was found to increase the shaft power output by 35%. The improvement of the piston ring material prolongs the life of the piston ring but the result was still inadequate for actual use. The use of helium in place of air for the working fluid resulted in a decrease in the shaft power output. The mechanical inertia is suspected to limit the running speed of the engine and make the engine unable to reach the optimum speed for use with helium. A comparison of the loss of MDSE with engines with high temperature difference (HDSE) and low temperature difference (LDSE) using the method of Iwamoto, S. pointed to the deficiency of this method by not including the effect of charged pressure. To improve the comparison, this study adopted the method of Prieto, J.L. The comparison indicated an increase in the dimensionless loss term from LDSE, MDSE and HDSE respectively. The existing MDSE also has the dimensionless loss term of a comparable value to the HDSE which indicate that improvement can still be done on the thermal design of the engine.

Department : Mechanical Engineering

Student's Signature 

Field of Study : Mechanical Engineering

Advisor's Signature 

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ ดำเนินงานจนสำเร็จเรียบร้อยได้ด้วยความสะดวก อุทิศสาธุะ อนุเคราะห์ช่วยเหลือ ด้วยน้ำใจจากบุคคลหลายท่านที่เป็น “ครู” ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังคีร์ ศรีภคกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนวทางในการค้นคว้าข้อมูล และข้อคิดเห็นในการวิจัยอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด ซึ่งผู้วิจัยขอสำนึกพระคุณไว้ด้วยความเคารพยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร. ณัฐเดช เพ็ญวรวงศ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และ พี่เเฟ ที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือตลอดจน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ หากมีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดในส่วนใดเกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียวและจะขอปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นในโอกาสต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	6
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	7
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ความสำคัญของค่ากำลังป้อน.....	8
2.2 กลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	9
2.3 การสูญเสียทางความร้อน.....	10
2.4 การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล.....	18
2.5 การสูญเสียทางกล.....	20
2.6 การสูญเสียความดัน.....	20
2.7 สรุป.....	21
บทที่ 3 การทดสอบสมรรถนะและการสูญเสียเบื้องต้น.....	23
3.1 การประเมินระดับความสามารถของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	23
3.2 การประเมินกลไกการสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเบื้องต้น.....	27
3.3 วิธีการประเมินการสูญเสียแบบย้อนกลับและการประเมินการสูญเสียหลัก.....	33

3.4 การเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิ ปานกลางกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำ.....	36
3.5 แนวการปรับปรุงวิธีการเปรียบเทียบการสูญเสียโดยใช้แนวคิดของ J.L Prieto....	39
3.6 การเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิ แตกต่างกัน.....	42
3.7 การเปรียบเทียบค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน กับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข	46
บทที่ 4 การปรับปรุงเครื่องยนต์.....	48
4.1 วิธีการเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีของ Taguchi.....	50
4.2 การเปลี่ยนแวนลูกลูกสูบกำลัง.....	59
4.3 การเปลี่ยนสารทำงานจากอากาศเป็นฮีเลียม.....	64
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 บทสรุป.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก อุปกรณ์การวัด.....	79
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบเครื่องยนต์.....	85
ภาคผนวก ค การประเมินความเป็นไปได้ในการวัดค่ากำลังบ่งชี้.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	107

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3-1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์.....	24
ตารางที่ 3-2 เงื่อนไขในการทดสอบ.....	25
ตารางที่ 3-3 ค่ากำลังบ่งชี้แบบไรมิตินอุดมคติ, ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดแบบไรมิติจริง, โครงสร้างและเงื่อนไขการทำงานของเครื่องยนต์แต่ละชนิด.....	41
ตารางที่ 3-4 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังบ่งชี้แบบไรมิตินอุดมคติที่ได้จากการประเมิน ($Z_{o,estm}$) กับค่ากำลังบ่งชี้แบบไรมิติจากการคำนวณแบบ isothermal.....	47
ตารางที่ 4-1 ตาราง Othogonal array L9.	51
ตารางที่ 4-2 วิธีการเปรียบเทียบลักษณะจำเพาะของตัวแปร.....	52
ตารางที่ 4-3 ตารางลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่ใช้ในการทดสอบ.....	53
ตารางที่ 4-4 ตาราง othogonal array สำหรับใช้ในการทดสอบ.....	53
ตารางที่ 4-5 ผลการคำนวณปริมาตรและน้ำหนักของ regenerator.....	54
ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบแรงเสียดทานและการสึกหรอของ virgin PTFE และ Rulon LD ซึ่งทดสอบบน steel	60
ตารางที่ 4-7 คุณสมบัติของ Rulon LR.....	61
ตารางที่ 4-8 ค่า Stanton number และ average Reynold number.....	64
ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 1 bar (ก่อนการเลือก regeneratrot ให้เหมาะสมที่สุด).....	86
ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 3 bar (ก่อนการเลือก regeneratrot ให้เหมาะสมที่สุด).....	86
ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 5 bar (ก่อนการเลือก regeneratrot ให้เหมาะสมที่สุด).....	87
ตารางที่ ข-4 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 7 bar (ก่อนการเลือก regeneratrot ให้เหมาะสมที่สุด).....	88
ตารางที่ ข-5 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 3 bar (หลังการเลือก regeneratrot ให้เหมาะสมที่สุด).....	89
ตารางที่ ข-6 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 5 bar (หลังการเลือก regeneratrot ให้เหมาะสมที่สุด).....	90

ตารางที่ ข-7 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 7 bar (หลังการเลือก regeneratrot ให้เหมาะสมที่สุด).....	91
ตารางที่ ข-8 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 7 bar หลังจากใช้แหวนลูกสูบกำลังนานกว่า 40 ชม.....	91
ตารางที่ ข-9 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 3 bar เมื่อใช้ ฮีเลียมเป็นสารทำงาน.....	92
ตารางที่ ข-10 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 5 bar เมื่อใช้ ฮีเลียมเป็นสารทำงาน.....	93
ตารางที่ ข-11 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 7 bar เมื่อใช้ ฮีเลียมเป็นสารทำงาน.....	93
ตารางที่ ข-12 ค่า β ที่ได้จากการเลือกลักษณะจำเพาะที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของ Taguchi.....	94
ตารางที่ ข-13 ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง simple เมื่อใช้อากาศเป็นสารทำงาน ที่ความดัน 7 bar อุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C.....	94
ตารางที่ ข-14 ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง simple เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงานที่ ความดัน 7 bar อุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C.....	95

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1-1 ส่วนประกอบหลักและหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	2
รูปที่ 2-1 วัฏจักรสเตอร์ลิงทางทฤษฎี.....	8
รูปที่ 2-2 แผนภาพ P-V ของ expansion space และ compression space.....	9
รูปที่ 2-3 กลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	10
รูปที่ 2-4 การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวน.....	11
รูปที่ 2-5 การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์.....	11
รูปที่ 2-6 การสูญเสียจากการนำความร้อนในผนังกระบอกสูบ.....	13
รูปที่ 2-7 การสูญเสียความร้อนแบบ shuttle loss.....	15
รูปที่ 2-8 การนำความร้อนเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงาน.....	16
รูปที่ 2-9 การสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านตัวลูกสูบ.....	16
รูปที่ 2-10 กลไกการสูญเสียความร้อนภายใน regenerator.....	17
รูปที่ 2-11 กลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	22
รูปที่ 2-12 กลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อรวมการสูญเสียต่างๆเข้าด้วยกัน	22
รูปที่ 3-1 ภาพตัดขวางของเครื่องยนต์.....	24
รูปที่ 3-2 ตำแหน่งการติดตั้ง thermo couple.....	25
รูปที่ 3-3 กำลังขาออกเทียบกับความเร็วรอบที่อุณหภูมิผิวของขดลวดความร้อนคงที่ 400 °C ที่ระดับความดันต่างๆ.....	26
รูปที่ 3-4 กำลังขาออกเทียบกับความเร็วรอบที่อุณหภูมิผิวของขดลวดความร้อนคงที่ 500 °C ที่ระดับความดันต่างๆ.....	26
รูปที่ 3-5 แผนภาพ sankey ของเครื่องยนต์.....	27
รูปที่ 3-6 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ.....	29
รูปที่ 3-7 การประเมินการสูญเสียด้วยแนวทางที่ 2.....	31
รูปที่ 3-8 การประเมินการสูญเสียด้วยแนวทางที่ 3.....	32
รูปที่ 3-9 การประเมินการสูญเสียแบบย้อนกลับ.....	34
รูปที่ 3-10 ผลการประเมินการสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์ที่กำลังขาออกสูงสุด.....	34
รูปที่ 3-11 ความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์และความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริงเทียบกับ ความเร็วรอบ.....	37

รูปที่ 3-12 ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์แบบไร้มิติเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ.....	38
รูปที่ 3-13 การสูญเสียทางกลแบบไร้มิติเทียบกับความเร็วรอบแบบไร้มิติ.....	38
รูปที่ 3-14 ประสิทธิภาพ indicated แบบไร้มิติเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ.....	39
รูปที่ 3-15 ผลการเปรียบเทียบการสูญเสียแบบไร้มิติเทียบกับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำ.....	44
รูปที่ 3-16 การเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติ ($\Phi_{estm}M_{expr}$) เทียบกับ ค่า $M_{expr}/M_{max,expr}$	45
รูปที่ 4-1 ตำแหน่งอุณหภูมิภายใน Heater, cooler และ regenerator.....	54
รูปที่ 4-2 ค่า β ในแต่ละระดับของตัวแปร.....	56
รูปที่ 4-3 ค่า $\Delta S/N$ ratio ของแต่ละตัวแปร.....	56
รูปที่ 4-4 กำลังขาออกที่ลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่เหมาะสมที่สุด.....	57
รูปที่ 4-5 ผลการเปรียบเทียบค่า $\Phi_{estm}M_{expr}$ เทียบกับ $M_{max,expr}$ ก่อนและหลังเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุด.....	58
รูปที่ 4-6 ภาพแหวนลูกสูบกำลังที่ใช้งานไป 10 ชั่วโมง (Teflon).....	60
รูปที่ 4-7 แหวนลูกสูบกำลังที่ทำจาก LR.....	61
รูปที่ 4-8 รูปแบบรอยตัดของแหวนลูกสูบเดิม.....	62
รูปที่ 4-9 รูปแบบรอยตัดแบบต่างๆ.....	62
รูปที่ 4-10 รอยตัดของแหวนลูกสูบกำลังที่ผลิตจาก Rulon LR.....	63
รูปที่ 4-11 ภาพของแหวนลูกสูบกำลังเมื่อใช้งานไป 40 ชั่วโมง.....	63
รูปที่ 4-12 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เมื่อใช้แหวนลูกสูบ.....	64
รูปที่ 4-13 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงาน.....	65
รูปที่ ก-1 อุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติ (Data Acquisition, DAQ).....	80
รูปที่ ก-2 อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบเครื่องยนต์ ยี่ห้อ Efector 100 รุ่น IG58.....	80
รูปที่ ก-3 จานเบรก.....	81
รูปที่ ก-4 การติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบิด.....	81
รูปที่ ก-5 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้ายี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น WT1030.....	82
รูปที่ ก-6 อุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้า.....	82

	หน้า
รูปที่ ก-7 ถังลมพร้อมกับอุปกรณ์ควบคุมแรงดันยี่ห้อ PUMA.....	83
รูปที่ ก-8 ถังฮีเลียมกับอุปกรณ์ควบคุมแรงดันยี่ห้อ MESSER.....	83
รูปที่ ก-9 ขดลวดไฟฟ้าแบบรัดท่อขนาดกำลังไฟฟ้า 4000 W.....	84
รูปที่ ค-1 วิธีการคำนวณค่ากำลังปั๊ม.....	98
รูปที่ ค-2 วิธีการและขั้นตอนการวัดค่ากำลังปั๊ม.....	99
รูปที่ ค-3 วงล้อ encoder.....	100
รูปที่ ค-4 แผนภาพวงจรลดสัญญาณรบกวนของ pressure transducer.....	101
รูปที่ ค-5 แผนภาพวงจรลดสัญญาณรบกวนของ shaft encoder.....	101
รูปที่ ค-6 แผนภาพของโปรแกรม.....	102
รูปที่ ค-7 ตำแหน่งที่สามารถทำการติดตั้ง pressure transducer ได้.....	104
รูปที่ ค-8 กลไกแบบเบตาของเครื่องย่นส์เตอร์ลิงที่มีอยู่.....	105

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A_{buffer\ wall}$	พื้นที่ผิวผนังภายนอกปริมาตรห้องเครื่อง, m^2
A_o	พื้นที่ที่สารทำงานไหลผ่าน, m^2
A	พื้นที่หน้าตัดของการนำความร้อน, m^2
C_{sf}	skin friction
C_{fd}	form drag
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของน้ำ, J/kg K
$C_{p,wall}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของผนังกระบอกสูบ, J/kg K
D_{piston}	เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ displacer , cm
D_h	hydraulic diameter($4V_{total}/A_o$), m
f	friction factor
h	ค่าคงที่การถ่ายเทความร้อน, $W/m^2\text{ }^\circ K$
k	ค่าคงที่การนำความร้อน, $w/m\text{ }^\circ K$
L_{heat}	ความยาวของ heat exchanger, m
L_{piston}	ความยาวลูกสูบ displace, cm
L_E	expansion power, W
L_C	compression power, W
L_i	กำลังปั๊มซี, W
L_m	การสูญเสียทางกล, W
L_s	กำลังขาออก, W
$L_{electric}$	กำลังไฟฟ้าขาออกที่วัดได้จากมอเตอร์, W
$L_{motor\ loss}$	กำลังจากการสูญเสียภายในมอเตอร์, W
L_{leak}	การสูญเสียความดันเนื่องจากการรั่วที่ลูกสูบกำลัง, W
L_{buf}	การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง, W
$L_{flow\ friction}$	การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล, W
m_{buf}	มวลของสารภายในปริมาตรห้องเครื่อง, kg
$\dot{m}_{ave}$	อัตราการไหลของมวลก๊าซทำงานเฉลี่ย, kg/s
$\dot{m}_{water}$	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น, kg/s
m	มวลของผนังกระบอกสูบที่เกิดการนำความร้อน, kg
m_{regen}	มวลของ regenerator, g

M_{expr}	Mach number ที่ได้จากผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์
M_{numr}	Mach number ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข
$M_{max,pred}$	Mach number ที่ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดที่ได้จากการทำนาย
$M_{max,expr}$	Mach number ที่ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์
N_{tu}	Number of transfer unit
n_s	ความเร็วรอบ, rpm
P_{buf}	ความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง, Pa
Δp_{max}	ความดันสูญเสียสูงสุด, Pa
P_m	ความดันของสารทำงานของเครื่องยนต์, Pa
Q_{in}	ความร้อนจากขดลวดความร้อน, W
Q_h	ความร้อนที่เข้าสู่เครื่องยนต์จริง, W
Q_b	การสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์, W
$Q_{insulate}$	การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวน, W
$Q_{engine\ structure}$	การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของเครื่องยนต์, W
Q_{reject}	ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์, W
$Q_{wall\ conduct}$	การสูญเสียจากการนำความร้อนในผนังกระบอกสูบ, W
Q_{sh}	shuttle loss, W
Q_{regen}	การสูญเสียภายใน regenerator, W
Q_{cond}	การนำความร้อนรวมของเครื่องยนต์, W
Q_{leak}	การนำความร้อนเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงาน, W
Q_{other}	การสูญเสียรวมระหว่างการสูญเสียความร้อนภายใน regenerator และการสูญเสียจากการนำความร้อน, W
Re	Reynolds number, $\frac{\rho u D_h}{\mu}$
R	ค่าคงที่ของก๊าซ, J/kg °K
S	ระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกสูบ displacer, cm
SN_i	ค่า S/N ratio
St	Stanton number, $\frac{h}{\rho c_p u}$
T_{in}	อุณหภูมิก๊าซทำงานที่ไหลจาก compression space เข้าปริมาตรห้องเครื่อง, °K

T_{wbuf}	อุณหภูมิผนังปริมาตรห้องเครื่อง, °K
$T_{water,in}$	อุณหภูมิน้ำขาเข้า cooler, °K
$T_{water,out}$	อุณหภูมิน้ำขาออกจาก cooler, °K
ΔT_i	ผลต่างของอุณหภูมิผิวด้านบน และ ผิวด้านล่างของของผนัง กระบอกสูบ, °K
$\Delta T_{r,ave}$	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายใน regenerator, °K
T_{buf}	อุณหภูมิของก๊าซภายในปริมาตรห้องเครื่อง, °K
$T_{buffer\ wall}$	อุณหภูมิผนังด้านนอกปริมาตรห้องเครื่อง °K
$T_{surround}$	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, °K
T_e	อุณหภูมิฝั่งร้อน, °K
T_c	อุณหภูมิฝั่งเย็น, °K
Δt	ระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป, s
t	เวลา, s
u	ความเร็วของสารทำงาน, m/s
u_{max}	ความเร็วสูงสุดของสารทำงาน, m/s
V_{buf}	ปริมาตรห้องเครื่อง, m ³
V_{dead}	ปริมาตรตายทั้งหมดของเครื่องยนต์(heater, regenerator, cooler และ clearance volume), cm ³
V_o	ปริมาตรตายของ regenerator, cm ³
$\dot{V}$	อัตราการไหลของปริมาตรอากาศ, m ³ /s
V_{regen}	ปริมาตรวัสดุ regenerator, cm ³
V_{sw}	ปริมาตรกวาดด้านขยายตัว, cm ³
V_{total}	ปริมาตรทั้งหมด, cm ³
Δx	ระยะทางในการนำความร้อน, m
x	input ของสมการ ideal function, W
y	output ของสมการ ideal function, W
ζ_{pred}	ค่าทำนายกำลังบ่งชี้แบบไรมิติ
ζ_{expr}	ค่ากำลังบ่งชี้แบบไรมิติที่ได้จากผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์
$\zeta_{max,pred}$	ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดแบบไรมิติจริงที่ได้จากการทำนาย
$\zeta_{max,expr}$	ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดแบบไรมิติจริงที่ได้จากผลการทดสอบ สมรรถนะเครื่องยนต์,

$\zeta_{o,numr}$	ค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal
$\zeta_{o,estm}$	ค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน
β	ค่าคงที่ของสมการ ideal function
μ	ค่าความหนืด, $10^{-6} Pa.s$
γ	ค่า c_p/c_v ของสารทำงาน
ω	ความเร็วเชิงมุม, rad/s
ρ	ความหนาแน่นของสารทำงาน, kg/m^3
ϵ	ประสิทธิภาพของ regenerator
δ	ระยะช่องว่างระหว่างกระบอกสูบและลูกสูบ displacer, cm
$\emptyset$	ค่าความพรุน
Φ_{numr}	ค่าคงที่การสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข
Φ_{estm}	ค่าคงที่การสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติที่ได้จากการประเมิน