

วารสารวิศวกรรมศาสตร์

การออกแบบ ทดลองและพัฒนาระบบเครื่องยนต์ สเตอร์ลิง

มุกิตา ศิริรัชตานนท์^{a,*}, มาลูน วงศ์สวัสดิ์^b, เยาวนิสภ์ เครือเทศน์^c, วัชร เดโชพลชัย^d,
และ วิทยา ยงเจริญ^e

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330
อีเมล: namkao@hotmail.com^{a,*}, ilune.circle@hotmail.com^b, f5ting4freedom@gmail.com^c,
watchara13634@hotmail.com^d, fmewyc@eng.chula.ac.th^e

บทคัดย่อ บทความนี้ กล่าวถึงการออกแบบและสร้างระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก และการใช้ชุด
การทดลองหาสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแก๊สที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกำลังทางทฤษฎี
การทดสอบใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งความร้อนและวิธีการเลือกเบรกวัดแรงบิดของเครื่องยนต์ จากการ
ทดลองพบว่าที่ผลต่างอุณหภูมิเริ่มทำงานของเครื่องยนต์ 63.8 °C มีความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงสุด 81.0
rpm กำลังขาออกสูงสุด 0.022 W ที่อุณหภูมิด้านร้อนของเครื่องยนต์ 148 °C ที่ความเร็วรอบ 54.0 rpm
และมีประสิทธิภาพรวมของชุดทดลองสูงสุดมีค่า 0.0646% ที่อุณหภูมิทำงานและความเร็วรอบเดียวกัน

คำสืบค้น: เครื่องยนต์สเตอร์ลิง, การออกแบบ, การทดลอง, การหาสมรรถนะ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (ISSN: 1906-3636) ปีที่ 4 ฉบับที่ 2

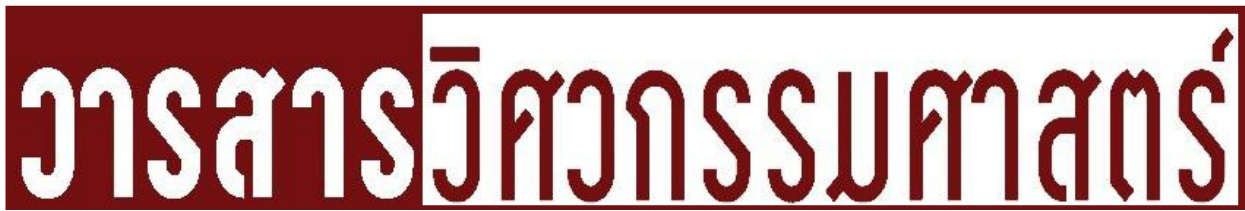
วันที่ส่ง 22 พฤศจิกายน 2555

วันที่ตอบรับ 8 มกราคม 2556

วันที่ตีพิมพ์ 30 มกราคม 2556

Online at <http://www.ej.eng.chula.ac.th/>

DOI:10.4186/ejth.2012.4.2.17



Design, Development and Testing of a Stirling Engine

Mutita Siriruchatanon^{a,*}, Maloon Wongsawat^b, Yaowanit Kruathed^c, Watchara Dachoponchai^d,
and Withaya Yongchareon^e

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330,
Thailand

E-mail: namkao@hotmail.com^{a,*}, ilune.circle@hotmail.com^b, f5ting4freedom@gmail.com^c,
watchara13634@hotmail.com^d, fmewyc@eng.chula.ac.th^e

Abstract. This paper concerned with the design, development and testing of a gamma Stirling engine. The experimental apparatuses were also developed to determine the engine performance at varying speeds and hot-side temperatures. The measurements were then compared with the calculated power. In the experiment, an electric heater was used as the heat source, and the rope-brake method was used to measure engine torque. From the experiment, the lowest different temperature of the engine that could start the engine was 63.8 °C, the engine maximum speed was 81.0 rpm, and the maximum output power of the engine was 0.022 W at the working temperature of 148 °C and speed of 54.0 rpm. The maximum overall efficiency of the apparatus was 0.0646% at the same conditions.

Keywords: Stirling engine, design, experiment, efficiency.

Engineering Journal (ISSN: 1906-3636) Volume 4 Issue 2

Received 22 November 2012

Accepted 8 January 2013

Published 30 January 2013

Online at <http://www.ej.eng.chula.ac.th/>

DOI:10.4186/ejth.2012.4.2.17

1. บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานของโลกสูงขึ้น อีกทั้งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ปัญหานี้ทำให้เกิดการตื่นตัวในการคิดค้นพลังงานทางเลือกและเทคโนโลยีอื่น ๆ เพื่อนำมาทดแทน โดยหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจ คือ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงซึ่งถูกคิดค้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1816 แต่ไม่ได้รับความนิยมแพร่หลาย เนื่องจากยังมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ชนิดอื่น แต่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีจุดเด่นที่ทำงานเงียบ มีความสะอาดและความปลอดภัยสูง เพราะเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกแบบระบบปิดโดยใช้อากาศหรือก๊าซร้อนเป็นสารทำงาน ดังนั้นหากเครื่องยนต์ดังกล่าวได้รับการพัฒนาและปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ จะทำให้สามารถลดปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ [1]

- การศึกษากำลังขาออกและประสิทธิภาพแบบต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทั้งทางทฤษฎีและการทดลองและทางทฤษฎีจึงเป็นอีกแนวทางที่นำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงเครื่องยนต์ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ คือ แบบ Piston-Piston (ประกอบด้วยลูกสูบกำลังสองอัน) และแบบ Piston-Displacer (ประกอบด้วยลูกสูบกำลังและลูกสูบไล่) ซึ่งเครื่องยนต์สองประเภทนี้แตกต่างกันที่การทำงานของลูกสูบกำลังและลูกสูบไล่ โดยลูกสูบกำลังมีหน้าที่ในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายในตัวเครื่องยนต์และถ่ายทอดกำลังไปยังชุดกลไกถ่ายทอดกำลัง ส่วนลูกสูบไล่มีหน้าที่ในการทำให้เกิดการขับเคลื่อนสารทำงาน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทั้งสองประเภทยังสามารถจำแนกย่อยได้เป็น 4 ชนิด [2] คือ แอลฟา เบตา แกมมา และ Double - Acting
- เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาเป็นเครื่องยนต์แบบ Piston-Piston ที่เป็นแบบพื้นฐานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอื่นๆ โดยลักษณะการทำงานประกอบด้วยลูกสูบกำลังสองชุดอยู่ในกระบอกสูบที่แยกจากกัน โดยกระบอกสูบทั้งสองจะแบ่งเป็นด้านร้อนซึ่งเป็นกระบอกสูบที่มีอุณหภูมิสูงกว่า และด้านเย็นซึ่งเป็นกระบอกสูบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนการเคลื่อนที่ของสารทำงานจากพื้นที่หนึ่งไปอีกพื้นที่หนึ่งจะผ่านทางเดินและวาล์วเนอเรเตอร์ที่อยู่ด้านนอก [3]
- เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบตาเป็นเครื่องยนต์แบบ Piston-Displacer ที่มีลูกสูบกำลังและลูกสูบไล่อยู่ในกระบอกสูบเดียวกัน โดยมีวาล์วเนอเรเตอร์ชุดอยู่รอบลูกสูบไล่ หรือวาล์วเนอเรเตอร์อาจเป็นส่วนหนึ่งของลูกสูบไล่ก็ได้ โดยส่วนีตเตอร์จะอยู่ปลายด้านหนึ่ง ในขณะที่คูลเลอร์จะอยู่อีกด้านหนึ่ง

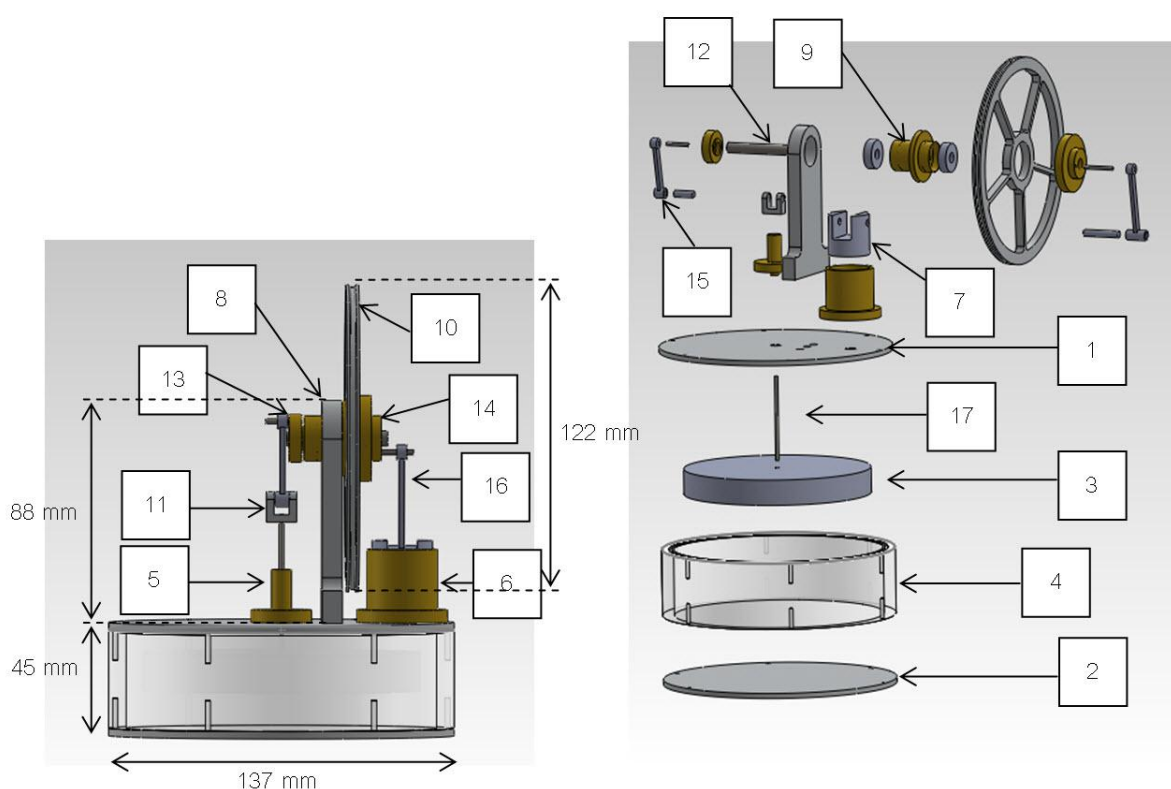
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาคล้ายกับชนิดเบตา แต่มีลูกสูบกำลังและลูกสูบไล่อยู่ในกระบอกสูบที่แยกออกจากกัน โดยตัววาล์วเนอเรเตอร์อาจจะอยู่ภายในหรือนอกกระบอกสูบก็ได้ โดยการแยกส่วนกันของลูกสูบกำลังและลูกสูบไล่จะช่วยลดการสูญเสียทางความร้อน แต่ในขณะเดียวกันเมื่อแยกลูกสูบกำลังและลูกสูบไล่ออกจากกัน จะทำให้อัตราส่วนกำลังอัด (Compression Ratio) ของเครื่องยนต์น้อยลง แต่กลไกของเครื่องยนต์ง่ายขึ้น

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิด Double - Acting เป็นการนำเอาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงหลายชุดมาต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน โดยพื้นที่ทำงานขยายตัวของกระบอกสูบหนึ่งจะต่อเข้ากับพื้นที่ทำงานอัดตัวในอีกกระบอกสูบหนึ่ง เพื่อให้ได้ขนาดกำลังขาออกที่มากขึ้นโดยที่ขนาดของเครื่องยนต์จะเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของกำลังขาออก เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบ Double - Acting จะสร้างได้ยากเนื่องจากจำเป็นจะต้องสร้างกลไกขับเคลื่อนที่ซับซ้อนและจะต้องมีการกันรั่วที่ดี

ความไม่ซับซ้อนของกลไกเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา เป็นสาเหตุหลักที่เลือกเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา มาสร้างและทดลองเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ นอกจากนั้นเครื่องยนต์ชนิดนี้ยังสามารถใช้กับกระบอกสูบได้หลายกระบอกสูบ ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาได้รับความนิยม และ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ

2. การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่สร้างขึ้นดัดแปลงแบบมาจากแบบของโครงการก่อนหน้า ([4] และ [5]) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 และหน้าที่ของแต่ละชิ้นส่วนรวมถึงชนิดของวัสดุที่เลือกใช้ และคุณสมบัติสำคัญของแต่ละชิ้นส่วนได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยมีรายละเอียดใน [6] โดยงานวิจัยที่พัฒนาเพิ่มเติมได้ดัดแปลงให้เครื่องยนต์เหมาะแก่การทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ละเอียดมากขึ้น เช่น การเจาะร่องที่ล้อตุนกกำลังเพื่อเป็นร่องให้เชือกในการทดลองหาแรงบิดด้วยวิธีเชือกเบรก รวมทั้งออกแบบให้เครื่องยนต์ให้สามารถใช้งานได้โดยชิ้นส่วนไม่เกิดความเสียหาย เมื่อแหล่งให้พลังงานความร้อน หรือ ฮีตเตอร์มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $100\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเครื่องยนต์ทำงานได้ต่อเนื่องและสม่ำเสมอ สามารถหมุนได้ด้วยตัวเองได้ไม่ต่ำกว่า 10 นาที และมีกำลังขาออกมากพอ ที่ทำให้สามารถวัดแรงบิดได้โดยวิธีเชือกเบรก



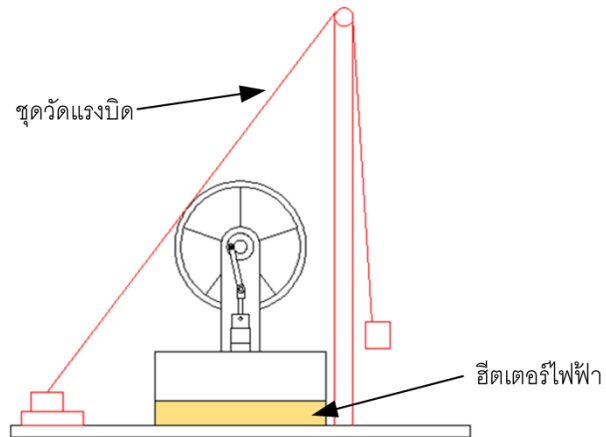
รูปที่ 1 ส่วนประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่ออกแบบ

ตารางที่ 1 ชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

ชั้นที่	ชื่อ	หน้าที่	คุณสมบัติ	วัสดุ
1	Top Plate	คูเลเตอร์	ถ่ายเทความร้อนได้ดีและรับน้ำหนักของชิ้นส่วนด้านบนได้	อะลูมิเนียม
2	Bottom Plate	ฮีตเตอร์	ถ่ายเทความร้อนได้ดีและทนอุณหภูมิได้ไม่ต่ำกว่า 200 °C	อะลูมิเนียม
3	Displacer	ลูกสูบไล่สารทำงาน	มวลน้อย เพื่อลดความเฉื่อยของเครื่องยนต์ (น้อยกว่า 20 กรัม)	โฟมและไม้บัลซ่า
4	Displacer Chamber	กระบอกสูบ	นำความร้อนต่ำและทนอุณหภูมิได้ไม่ต่ำกว่า 200 °C	ซูเปอร์ลีน (Nylon 6)
5	Displacer Gland	ควบคุมให้ลูกสูบไล่เคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง	มีความลื่นสูง	ทองเหลือง
6	Power Cylinder	กระบอกสูบลูกสูบกำลัง	มีความลื่นสูง	ทองเหลือง
7	Power Piston	ลูกสูบกำลัง	ผิวแข็งและมีความลื่น	เทฟลอน (PTFE)
8	Bearing Stand	รับน้ำหนักทั้งหมด	น้ำหนักเครื่องยนต์ด้านบนได้และผิวล่างเรียบ	อะลูมิเนียม
9	Bearing Mount	กรอบเพื่อใส่ตลับลูกปืน	รูสำหรับใส่ตลับลูกปืนต้องมีขนาดพอดีกับตลับลูกปืน มีโมเมนต์ความเฉื่อยมากพอสมควร	ทองเหลือง
10	Flywheel	ล้อตุ่นกำลัง	ในขณะที่มีมวลน้อยและมีรูปร่างสำหรับวางพาดเชือก	อะลูมิเนียม
11	Motion Converter	เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่จากการหมุนเป็นแนวตรง	น้ำหนักเบาและมีความลื่น	เทฟลอน (PTFE)
12	Main Shaft	ส่งผ่านกำลังจากทางด้านลูกสูบกำลังไปที่ลูกสูบไล่	มีขนาดมากพอที่จะรับน้ำหนักและแรงจากการทำงานของเครื่องยนต์	เหล็กกล้าไร้สนิม
13	Displacer Crank Disk	จานข้อเหวี่ยงลูกสูบไล่	ขนาดและมวลไม่มากจนเกินไปจนทำให้ส่งผลต่อเพลาลูก	ทองเหลือง
14	Power Crank Disk	จานข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง	ขนาดและมวลไม่มากจนเกินไปจนทำให้ส่งผลต่อเพลาลูก	ทองเหลือง
15	Displacer Connecting Rod	ส่งกำลังจาก Displacer Crank Disk ไปยัง Motion Converter	น้ำหนักเบาและมีความลื่น	เทฟลอน (PTFE)
16	Power Connecting Rod	ส่งกำลังจาก Power Piston ไปยัง Power Crank Disk	น้ำหนักเบาและมีความลื่น	เทฟลอน (PTFE)
17	Displacer Rod	เชื่อมระหว่าง Displacer และ Motion Converter	น้ำหนักเบา ไม่เกิดสนิม ไม่โค้งงอเมื่อรับแรง	เหล็กกล้าไร้สนิม

3. การออกแบบชุดการทดลอง

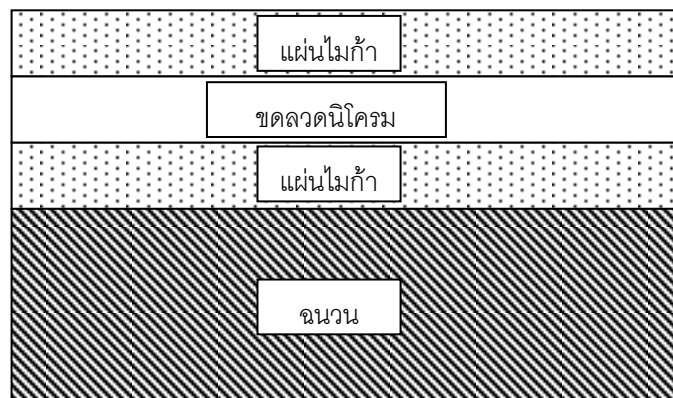
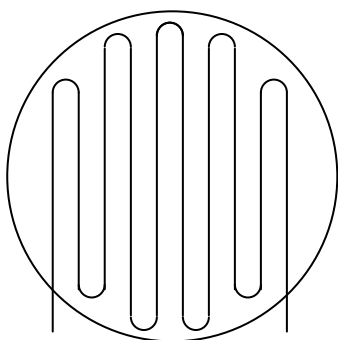
ได้ออกแบบชุดทดลองโดยคำนึงถึงปัญหา [5] เช่น แหล่งความร้อนที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ การติดตั้งชุดทดลองที่ไม่แข็งแรง การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นการสร้างชุดการทดลองจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และ ชุดวัดแรงบิด ดังรูปที่ 2 โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่มีเฟสการทำงานที่แน่นอน เมื่อได้รับความร้อน flywheel จะมีทิศทางการหมุนที่แน่นอน กล่าวคือ flywheel ไม่มีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา



รูปที่ 2 รูปและ Schematic Diagram ของชุดทดลอง

3.1. การออกแบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า

ได้ออกแบบฮีตเตอร์เป็นแผ่นกลมตามลักษณะของ Bottom Plate ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแก๊สมา โดยประกอบด้วยชุดหลอดความร้อนซึ่งนำมาขดกลับไปกลับมาบนแผ่นฉนวนซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การจัดเรียงชุดหลอดนิโครมและการจัดเรียงส่วนประกอบฮีตเตอร์

เลือกใช้ชุดหลอดความร้อนนิโครมเป็นวัสดุในการให้ความร้อน เนื่องจากสามารถให้ความร้อนได้สูงโดยออกแบบให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ฮีตเตอร์มีค่าไม่เกิน 1.5 A และคำนวณความยาวของเส้นหลอดนิโครมที่นำมาสร้างฮีตเตอร์โดยกำหนดให้ฮีตเตอร์สามารถผลิตกำลังได้ 100 W ซึ่งได้ความยาวหลอดนิโครมเป็น 1.84 m

ออกแบบให้แผ่นไมก้าที่ใช้ติดขดลวดนิโครม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าขนาดของส่วนให้ความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเล็กน้อยที่มีขนาด 123 mm จึงกำหนดให้แผ่นไมก้ามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm และติดฉนวนความร้อนที่ด้านใต้ของแผ่นฮีตเตอร์เพื่อให้ความร้อนถ่ายเทได้ทางฝั่งที่สัมผัสกับเครื่องยนต์เพียงฝั่งเดียว ดังนั้นจะได้ฮีตเตอร์แผ่นวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm หนา 10 mm

สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของขดลวดไฟฟ้า สามารถควบคุมได้จากการปรับกระแสไฟฟ้าไปยังค่าที่ต้องการ และอ่านค่าอุณหภูมิของขดลวดไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สถานะ steady โดยอุณหภูมิของขดลวดไฟฟ้าจะมีการแกว่งประมาณ 1°C

3.2. การออกแบบชุดวัดแรงบิด

ชุดวัดแรงบิด (รูปที่ 2) ประกอบด้วย เสาที่ติดตั้งรอกไว้ด้านบน เพื่อให้เชือกร้อยผ่านไปสัมผัสกับล้อตุ่นกำลัง และมีตม้น้ำหนักที่รู้น้ำหนักแน่นอนผูกที่ปลายของเชือกซึ่งนำไปวางบนเครื่องชั่งน้ำหนัก ส่วนอีกด้านหนึ่งของเชือกจะมีมวลถ่วงเช่นกัน โดยมวลถ่วงดังกล่าวสามารถเพิ่มลดปริมาณได้ในระหว่างทดลอง

สำหรับการหาค่ามวลถ่วงที่เหมาะสมในการวัดแรงบิด ได้ทำการชั่งน้ำหนักของมวลถ่วงจำนวน 100 ชิ้น เพื่อหาคำนวนหาค่าเฉลี่ยของมวลถ่วงจำนวน 1 ชิ้น และทำการสุ่มตัวอย่างของมวลถ่วงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของน้ำหนักที่คำนวณได้

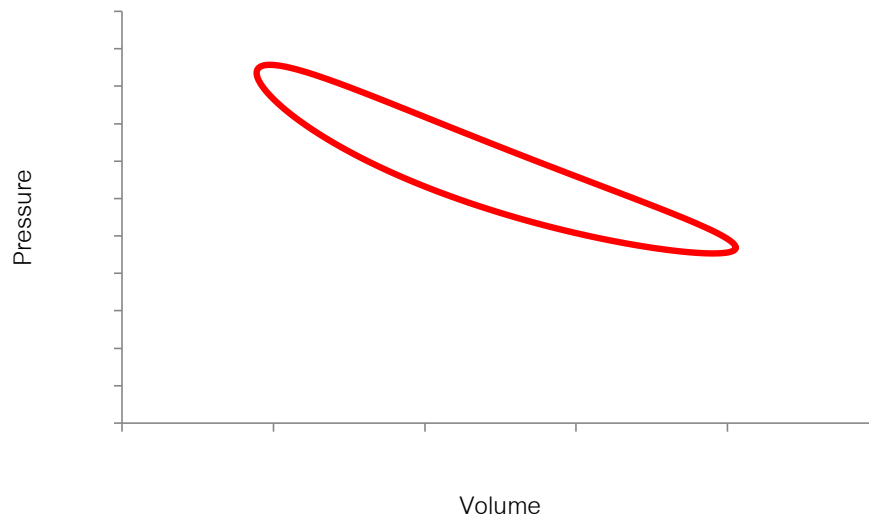
สำหรับการจัดตำแหน่งการวัดแรงบิด ได้คำนวณหาระยะห่างของเครื่องชั่งน้ำหนักติดต่อกับเครื่องยนต์ และหาความสูงของเสาที่ติดตั้งรอกให้เชือกพาดตม้น้ำหนัก เทียบกับมุมกระทำของเชือกกับล้อเพื่อหาระยะห่างและความสูงที่เหมาะสม โดยไม่ให้ความสูงมีค่ามากเกินไป และเลือกค่ามุมที่ทำให้ระยะห่างของเครื่องชั่งน้ำหนักยังอยู่ภายในฐานรองรับชุดการทดลอง

4. ทฤษฎีและการคำนวณ

การคำนวณกำลังขาออกและกำลังขาเข้าทางทฤษฎีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง หรือการคำนวณกำลังป้อนของเครื่องยนต์ มีหลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการคำนวณด้วยวัฏจักร Isothermal-Harmonic Motion หรือเรียกอีกอย่างว่า Schmidt Analysis [7]

วัฏจักร Isothermal-Harmonic Motion เป็นวัฏจักรที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้ 1) การอัดตัวและขยายตัวของสารทำงานเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Compression and Expansion) 2) สารทำงานเป็นก๊าซอุดมคติและมีค่าความจุความร้อนจำเพาะคงที่ 3) ในขณะใด ๆ ระบบมีการเปลี่ยนแปลง และไม่อยู่ในสภาวะคงตัว (Transient State) 4) การหมุนของเพลาลูกของเครื่องยนต์มีอัตราเร็วสม่ำเสมอ 5) ไม่มีความดันสูญเสียในระบบ และสารทำงานในระบบมีความดันสม่ำเสมอ 6) การกระจายตัวของอุณหภูมิในช่องว่างที่ลูกสูบไล่ที่ขณะใดๆ เทียบความยาว มีลักษณะเป็นเส้นตรง 7) ไม่มีการรั่วไหลของสารทำงาน 8) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำงานได้อย่างสมบูรณ์ และ 9) ช่องว่างระหว่างลูกสูบไล่ และกระบอกลูกสูบไล่ทำหน้าที่เป็นรีเจนเนอเรเตอร์อุดมคติที่แลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างสมบูรณ์

การคำนวณในวัฏจักรดังกล่าว อาศัยการรวมการคำนวณของช่วงวัฏจักรย่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งโดยทั่วไป นิยมลดรูปการคำนวณ โดยให้ปริมาตรด้านร้อน $V_{h,x}$ และปริมาตรด้านเย็น $V_{c,x}$ (รูปที่ 5) มีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของฟังก์ชันไซน์ อย่างไรก็ตาม การลดรูปดังกล่าว จะทำให้ค่าปริมาตรในช่วงขณะหนึ่ง ๆ คลาดเคลื่อนไป (รูปที่ 6) ดังนั้น ในการวิเคราะห์ในที่นี้ จึงใช้ค่าปริมาตรที่เกิดขึ้นจริง แทนการใช้ปริมาตรที่ผ่านการลดรูปด้วยฟังก์ชันไซน์ โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลขช่วยในการคำนวณดังนี้



รูปที่ 4 ช่วงวัฏจักร P-V diagram ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแก๊มาสำหรับ Schmidt Analysis

งานต่อการทำงานหนึ่งวัฏจักรหาได้จากการรวมงานในช่วงการเคลื่อนที่เล็ก ๆ ของวัฏจักร โดยในที่นี้ได้แบ่งวัฏจักรออกเป็น 360 ส่วนตามมุมการหมุนของจานข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง โดยเริ่มจากช่วง 0-1 องศา จนกระทั่งถึงช่วง 359-360 องศา สำหรับ งานรวมที่เกิดขึ้นในหนึ่งวัฏจักรการทำงาน W_{net}

$$W_{net} = \sum_{x=0}^{359} W_{x \rightarrow x+1} \quad (1)$$

เมื่อ $W_{x \rightarrow x+1}$ คืองานที่เกิดขึ้นระหว่างที่มุมการหมุนของจานข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังมีค่าตั้งแต่ x องศาจนถึง $x+1$ องศา

โดยงานในแต่ละช่วงมุมการหมุนของจานข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลัง หาได้จากการนำความดันเฉลี่ยในช่วงการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์คูณกับปริมาตรที่เปลี่ยนไปในช่วงนั้น ๆ

$$Q_{in, x \rightarrow x+1} = \left(\frac{P_x + P_{x+1}}{2} \right) (V_{x+1, h} - V_{x, h}) \quad (2)$$

เมื่อ P_x และ P_{x+1} คือความดันในเครื่องยนต์ V_x และ V_{x+1} คือปริมาตรรวมในเครื่องยนต์ เมื่อมุมการหมุนของจานข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังมีค่า x องศา และ $x+1$ ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกัน ความร้อนที่จ่ายให้แก่เครื่องยนต์ต่อหนึ่งวัฏจักร หาได้จากการรวมความร้อนที่เข้าเครื่องยนต์ในแต่ละช่วงการหมุนของเครื่องยนต์ สำหรับความร้อนรวมที่เข้าเครื่องยนต์ในหนึ่งวัฏจักรการทำงาน $Q_{in, net}$

$$Q_{in, net} = \sum_{x=0}^{359} Q_{in, x \rightarrow x+1} \quad (3)$$

เมื่อ $Q_{in, x \rightarrow x+1}$ คือความร้อนที่เข้าเครื่องยนต์ระหว่างที่มุมการหมุนของจานข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังมีค่าตั้งแต่ x องศาจนถึง $x+1$ องศา

สำหรับวัฏจักร Isothermal สามารถหาความร้อนขาเข้าทางทฤษฎีในช่วงการหมุนของจานข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังได้ ดังนี้

$$Q_{in, x \rightarrow x+1} = \left(\frac{P_x + P_{x+1}}{2} \right) (V_{x+1, h} - V_{x, h}) \quad (4)$$

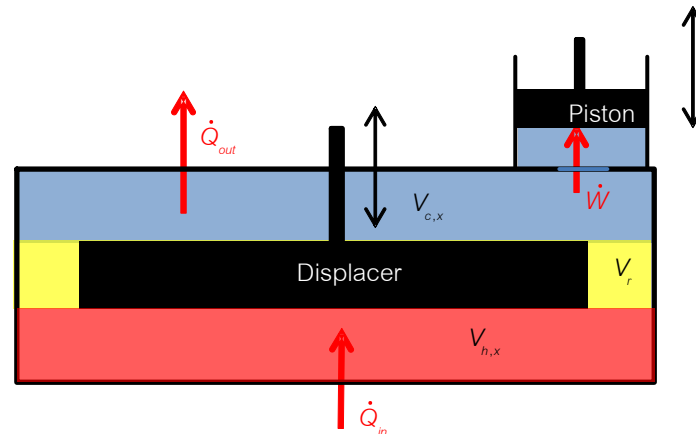
เมื่อ $V_{x, h}$ และ $V_{x+1, h}$ คือปริมาตรด้านร้อนของเครื่องยนต์ เมื่อมุมการหมุนของจานข้อเหวี่ยงลูกสูบกำลังมีค่า x องศา และ $x+1$ องศา ตามลำดับ

โดยความดัน และปริมาตรที่มุมใด ๆ คำนวณได้จาก

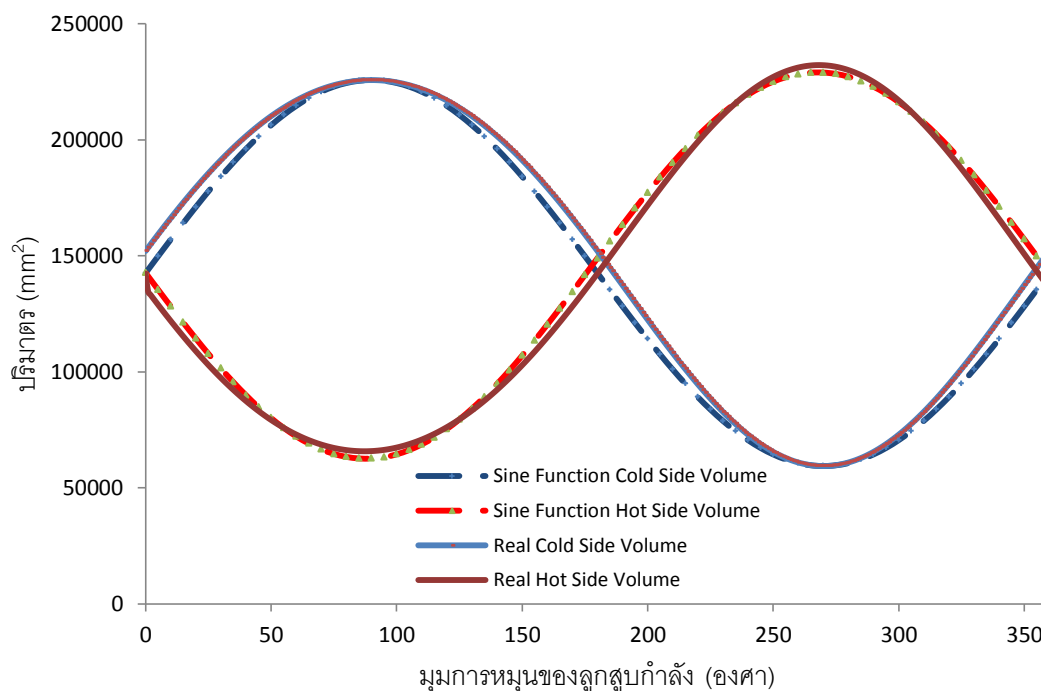
$$P_x = MR \left/ \left(\frac{V_{x+1,h}}{T_h} + \frac{V_{c,x}}{T_c} + \frac{V_r \ln(T_h/T_c)}{T_h - T_c} \right) \right. \quad (5)$$

$$V_x = V_{h,x} + V_{c,x} + V_r \quad (6)$$

เมื่อ M คือมวลของอากาศที่อยู่ภายในเครื่องยนต์ R คือค่าคงที่ของแก๊สสำหรับอากาศ T_h และ T_c คืออุณหภูมิด้านร้อน และด้านเย็นของเครื่องยนต์ตามลำดับ V_r คือปริมาตรของรีเจนเนอเรเตอร์ ปริมาตรแสดงในรูปที่ 5 จะแปรค่าไปตามตำแหน่งของเครื่องยนต์ โดยสามารถหาปริมาตรที่ตำแหน่งใด ๆ จากการหาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของลูกสูบของเครื่องยนต์

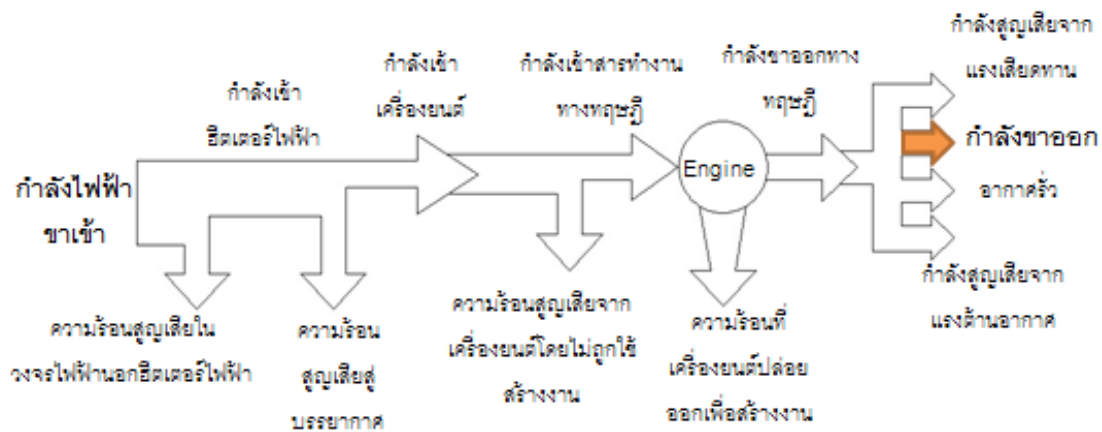


รูปที่ 5 ปริมาตรภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแก๊สมาในขณะใดขณะหนึ่ง



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบปริมาตรจริงของเครื่องยนต์และปริมาตรที่คำนวณโดยสมมติให้ปริมาตรของเครื่องยนต์

ในการวิเคราะห์หาความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียของชุดการทดลองตามหลักการทางวิศวกรรม ซึ่งสามารถจำแนกกำลังสูญเสียแต่ละส่วนได้ดังรูปที่ 7 และนำแผนภาพที่ได้มายึดเป็นหลักในการคำนวณหา กำลังสูญเสียในจุดต่าง ๆ



รูปที่ 7 แผนภาพพลังงานของชุดการทดลองและเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

จากแผนภาพพลังงาน เมื่อพิจารณาที่ตัวเครื่องยนต์ จะพบว่ากำลังเข้าสารทำงานทางทฤษฎี จะมีการสูญเสียเป็นความร้อนที่เครื่องยนต์คายออกสู่สิ่งแวดล้อม ขณะที่ถูกสูบกกำลังดันลง หรือเรียกได้ว่าเป็นความร้อนที่เครื่องยนต์ต้องปล่อยออกไปสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อให้เครื่องยนต์สามารถสร้างงานได้ ทำให้กำลังขาออกทางทฤษฎีลดลง และจากรูปที่ 7 สามารถนิยามประสิทธิภาพรวมของชุดการทดลอง คือประสิทธิภาพที่คิดกำลังขาออกที่นำไปใช้งานได้ทั้งหมด หรือกำลังกลที่เกิดจากการหมุนของ flywheel เทียบกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่เครื่องยนต์ ประสิทธิภาพรวมของเครื่องยนต์คือประสิทธิภาพรวมที่ไม่นับความสูญเสียที่เกิดจากชุดการทดลอง ประสิทธิภาพของฮีตเตอร์คือประสิทธิภาพของฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ประเมินจากความสามารถในการนำความร้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนคือประสิทธิภาพที่คำนวณจากกำลังขาออกและกำลังขาเข้าทางทฤษฎี ซึ่งคำนวณโดยใช้วิธีการ Isothermal-Harmonic Motion และ ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือประสิทธิภาพเชิงกลใช้ประเมินความสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์

$$\text{ประสิทธิภาพรวมของชุดการทดลอง} = \text{กำลังขาออก} / \text{กำลังไฟฟ้าขาเข้า} \quad (7)$$

$$\text{ประสิทธิภาพรวมของเครื่องยนต์} = \text{กำลังขาออก} / \text{กำลังเข้าเครื่องยนต์} \quad (8)$$

$$\text{ประสิทธิภาพฮีตเตอร์} = \text{กำลังเข้าเครื่องยนต์} / \text{กำลังไฟฟ้าขาเข้า} \quad (9)$$

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน} = \text{กำลังขาออกทางทฤษฎี} / \text{กำลังขาเข้าทางทฤษฎี} \quad (10)$$

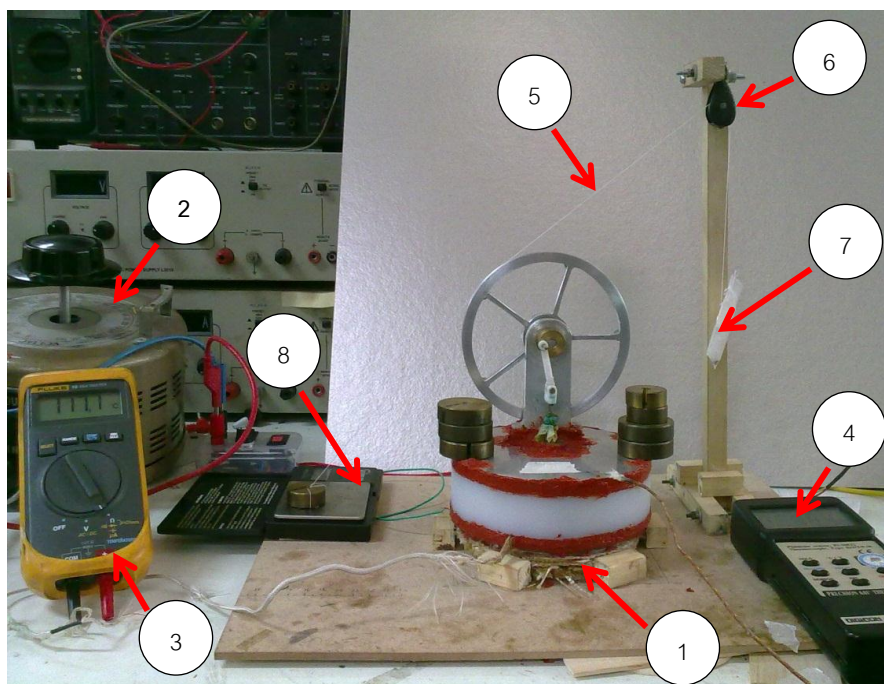
$$\text{ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือประสิทธิภาพเชิงกล} = \text{กำลังขาออก} / \text{กำลังขาออกทางทฤษฎี} \quad (11)$$

5. การทดลองหากำลังขาออกและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานได้โดยอาศัยแหล่งพลังงานความร้อนจากภายนอก เมื่อเครื่องยนต์รับความร้อนแล้ว จะเกิดผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นด้านรับความร้อนและแผ่นระบายความร้อนค่าหนึ่งซึ่งทำให้เครื่องยนต์ทำงาน เมื่อล้อตุนกำลังของเครื่องยนต์หมุนอย่างสม่ำเสมอแล้ว จะเริ่มเก็บค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วรอบ อุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น น้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องชั่งดิจิตอล เป็นต้น เพื่อนำไปหากำลังขาออกและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

5.1. การเตรียมการทดลอง

การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงไว้ในรูปที่ 8 และรายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีรายละเอียดดังตารางที่ 2



รูปที่ 8 การจัดเตรียมการทดลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแก๊สมา

ตารางที่ 2 รายละเอียดของชุดการทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแก๊สมา

หมายเลข	อุปกรณ์	รายละเอียดของอุปกรณ์
1	ฮีตเตอร์	ทำจากลวดนิโครมและแผ่นไมก้า ซึ่งให้พลังงานความร้อนสูงและสามารถควบคุมอุณหภูมิได้
2	แหล่งจ่ายไฟ	เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ควบคุมความต่างศักย์ได้ มีช่วงการทำงานระหว่าง 0-260 โวลท์ จ่ายกระแสที่พิกัด 10 แอมแปร์
3	เทอร์โมคัปเปิล วัดด้านร้อน	เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิด K (Type K) โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า แสดงผลเป็นตัวเลขดิจิทัล มีพิกัด 400 องศาเซลเซียส และความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส
4	เทอร์โมคัปเปิล วัดด้านเย็น	รายละเอียดเหมือนเทอร์โมคัปเปิล วัดด้านร้อน
5	เชือก	ใช้เส้นด้าย ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 มิลลิเมตร มีน้ำหนักเบา
6	รอกเบา	เพื่อผ่อนแรงในการวัดแรงบิด
7	ภาชนะใส่ตุ้มเหล็ก	เป็นชองพลาสติก ที่มีน้ำหนักเบา เพื่อใส่ตุ้มเหล็กหนัก 0.25 กรัม
8	เครื่องชั่งดิจิทัล	เป็นเครื่องมือชั่งวัดแรงตึงเชือก มีพิกัด 1000 กรัมและความละเอียด 0.1 กรัม

5.2. วิธีการทดลอง

จ่ายไฟแก่ฮีตเตอร์โดยปรับความต่างศักย์ที่แหล่งจ่ายไฟ ให้กระแสไฟฟ้าที่วัดโดยวัตต์มิเตอร์มีค่า 0.55 แอมแปร์ และในระหว่างที่อุณหภูมิในระบบกำลังเข้าสู่ภาวะคงตัว (เมื่ออุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิลวัดด้านร้อนมีค่าคงที่) ให้ใส่แรงหมุนล้อตุนกำลังจนล้อตุนกำลังสามารถหมุนได้ด้วยตัวเอง จากนั้นพาดเชือกผ่านล้อตุนกำลังขณะที่ล้อหมุน โดยที่ปลายเชือกด้านหนึ่งติดมวลชิ้นหนึ่งแล้ววางบนเครื่องชั่งดิจิทัล ปลายเชือกอีกด้านผูกกับภาชนะใส่ตุ้มเหล็ก ใส่ตุ้มเหล็กเพื่อเพิ่มแรงเสียดทานที่

ล้อยูนกำลัง บันทึกค่ามวลที่อ่านได้จากเครื่องชั่ง วัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ด้วยการจับเวลาที่ล้อยูนกำลังหมุนครบ 10 รอบ ทั้งในขณะที่ยึดตุ้มเหล็กและในขณะที่ยึดตุ้มเหล็กกับมวลที่ไม่ได้ยึดตุ้มเหล็ก ในขณะที่ยึดตุ้มเหล็กกับมวลที่ไม่ได้ยึดตุ้มเหล็ก จะได้จุดเริ่มต้นทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง สุดท้ายให้เพิ่มตุ้มเหล็กจนกว่าล้อยูนกำลังจะหยุดหมุน แล้ววัดค่าต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น เพื่อนำไปคำนวณหาแรงบิด T (หน่วยเป็นนิวตันเมตร) และกำลังขาออก P_{out} (มีหน่วยเป็นวัตต์) ซึ่งจะนำไปใช้หาประสิทธิภาพต่างๆ ของเครื่องยนต์ต่อไป

$$T = (F_1 - F_2) \times R \quad (12)$$

$$P_{out} = T \times (2\pi n)/60 \quad (13)$$

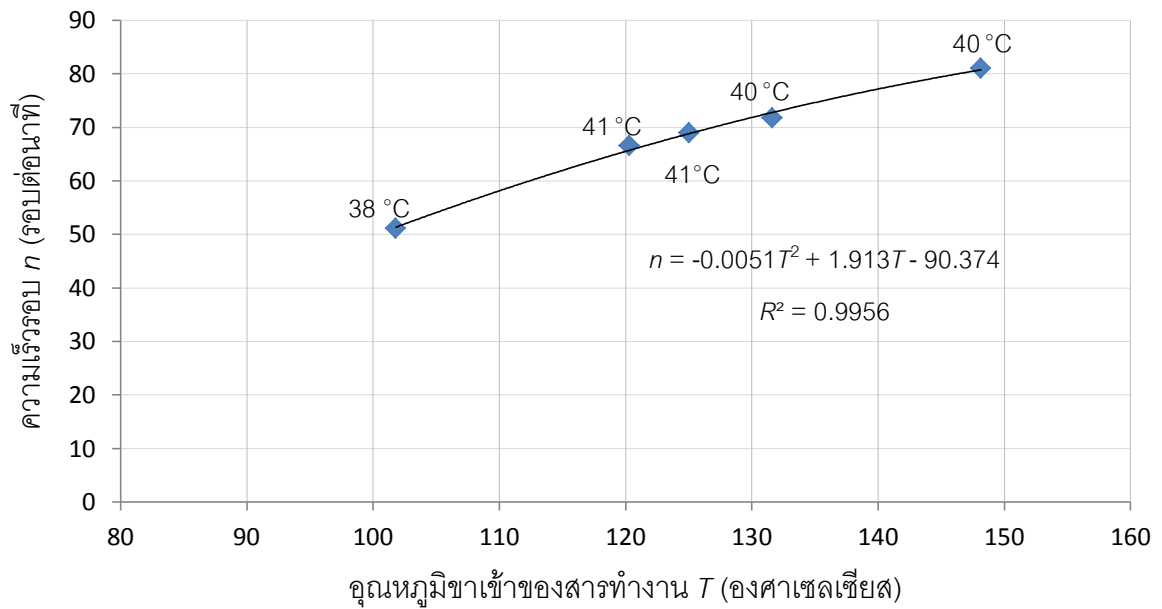
เมื่อ F_1 คือแรงดึงเชือกด้านเครื่องชั่งดิจิตอล หากจากความแตกต่างระหว่างมวลที่อ่านได้ขณะที่ยึดตุ้มเหล็กกับมวลที่ไม่ได้ยึดตุ้มเหล็กไว้ มีหน่วยเป็นนิวตัน F_2 คือน้ำหนักของตุ้มเหล็กทั้งหมดในของพลาสติกมีหน่วยเป็นนิวตัน R คือรัศมีของล้อยูนกำลัง มีหน่วยเป็นเมตร และ n คือความเร็วรอบของล้อยูนกำลัง มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm)

เริ่มทำการทดลองใหม่อีกครั้งด้วยวิธีข้างต้น แต่ปรับความต่างศักย์ที่แหล่งจ่ายไฟ ให้วัตต์มิเตอร์อ่านค่าได้เป็น 0.60, 0.65, 0.70 และ 0.75 แอมแปร์

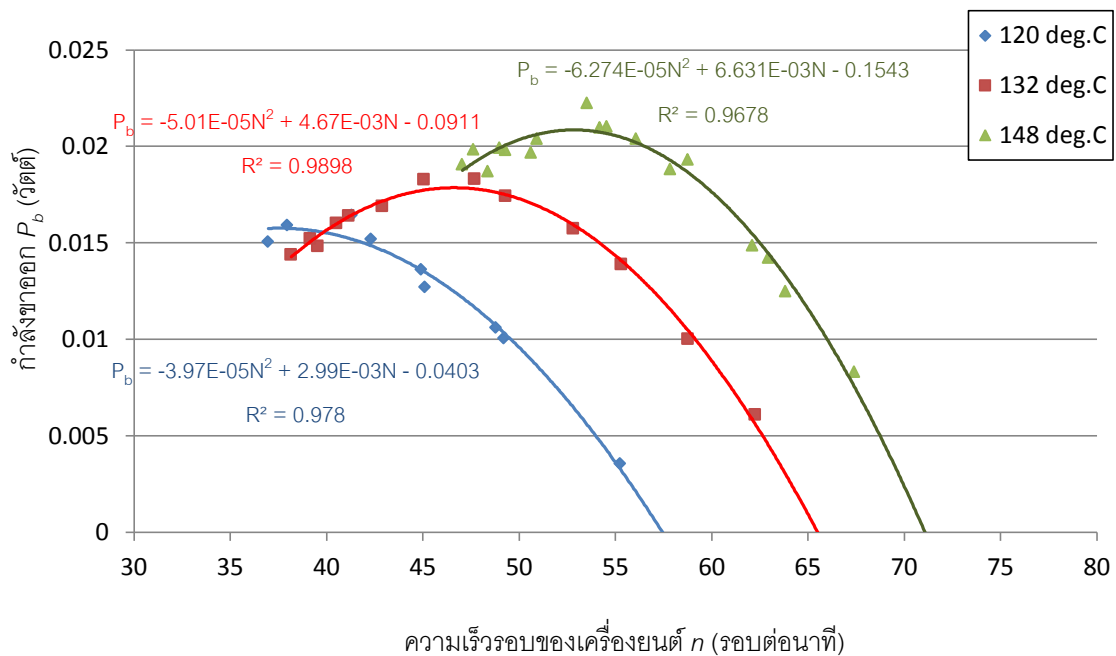
5.3. ผลการทดลอง

เครื่องยนต์เริ่มต้นทำงานเมื่ออุณหภูมิด้านร้อนของสารทำงานเป็น 101.8°C และมีผลต่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นได้เป็น 63.6°C โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เครื่องยนต์ 0.55 A และมีกำลังขาเข้าทางไฟฟ้า 17.6 W ที่ความเร็วรอบ 51.2 rpm เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและอุณหภูมิด้านร้อนของเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 9 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิด้านร้อนของเครื่องยนต์มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีความเร็วรอบเพิ่มขึ้นด้วยความชันที่ลดลง และมีแนวโน้มสูงสุดที่ความเร็วรอบประมาณ 90 rpm เมื่ออุณหภูมิด้านร้อนเพิ่มขึ้นถึง 185°C สำหรับอุณหภูมิด้านเย็นมีค่าคงที่ไปมา เนื่องจากไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมได้ ทำให้การแกว่งของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีผลกระทบกับอุณหภูมิด้านเย็น

ข้อมูลที่น่าสนใจในการเปรียบเทียบกำลังขาออก ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือประสิทธิภาพเชิงกล และประสิทธิภาพรวมมีทั้งหมด 3 ชุด ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่อุณหภูมิทำงานต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ได้แก่ 120°C , 132°C และ 148°C โดยอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิทำงานเฉลี่ย ซึ่งมาจากการให้กระแสไฟฟ้าค่าหนึ่งแก่อิเตอร์ และในการทดลองอุณหภูมิทำงานจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 3°C ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิทำงานจะมีค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าเป็น $0.65\text{ A} / 24.8\text{ W}$ และ $0.7\text{ A} / 28.7\text{ W}$ และ $0.76\text{ A} / 34.4\text{ W}$ ตามลำดับ โดยแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในรูปที่ 10

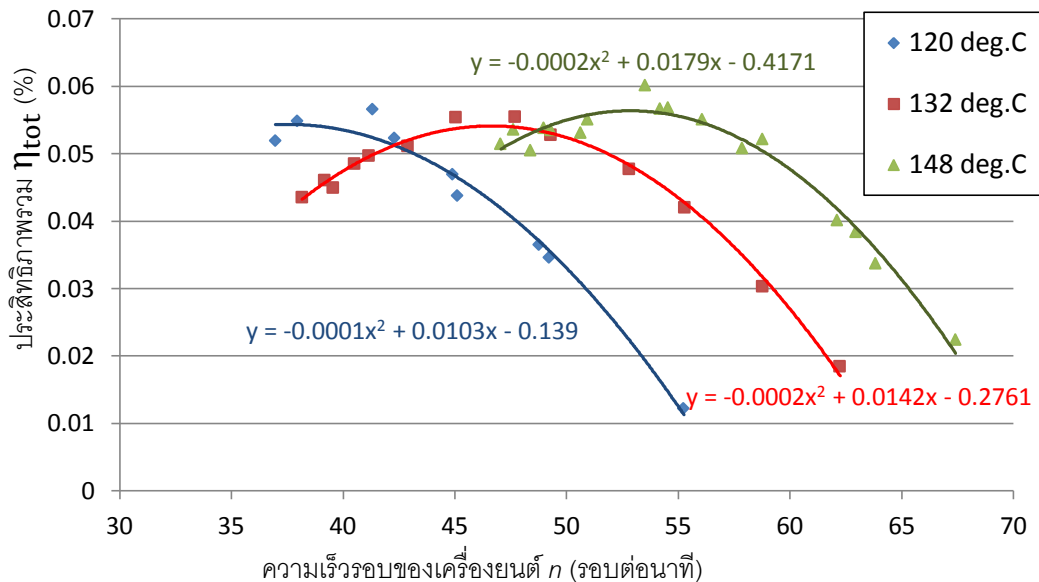


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็รรอบและอุณหภูมิด้านร้อนของสารทำงาน ตัวเลขกำกับที่จุดแสดงอุณหภูมิด้านเย็น



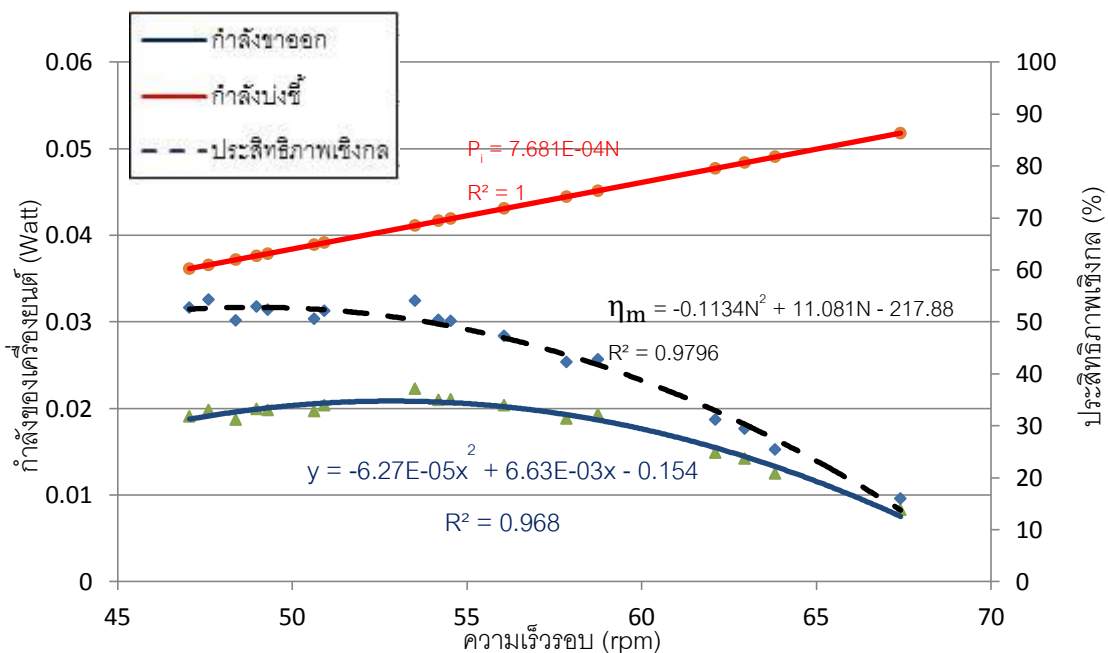
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกและความเร็รรอบที่อุณหภูมิทำงานต่างๆ ของเครื่องยนต์

เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวมของระบบ ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 7 และความเร็รรอบของเครื่องยนต์ จะได้กราฟดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวมของระบบและความเร็วรอบที่อุณหภูมิทำงานต่างๆ ของเครื่องยนต์

เปรียบเทียบความสัมพันธ์กำลังขาออกและกำลังบ่งชี้ที่ความเร็วรอบต่างๆ ของเครื่องยนต์จะได้กราฟดังรูปที่ 12 โดยกำลังขาออกได้จากการทดลอง กำลังบ่งชี้ได้จากผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีซึ่งคำนวณโดยใช้วัฏจักร Isothermal-Harmonic motion ตามสมการในหัวข้อที่ 4 และประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือประสิทธิภาพเชิงกลที่ความเร็วรอบต่าง ๆ คำนวณจากสมการที่ 11



รูปที่ 12 กำลังออกและประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือประสิทธิภาพเชิงกลของที่ความเร็วรอบต่าง ๆ โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าเข้าเป็น 0.75 A

กราฟของกำลังขาออกมีลักษณะเป็นพาราโบลาคว่ำ เนื่องจากที่ค่าความเร็วรอบมากกว่าความเร็วรอบที่ทำให้กำลังขาออกสูงสุด กำลังขาออกจะมีค่าลดลง เพราะกำลังสูญเสียที่เกิดจากอากาศรั่ว แรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศมีค่ามาก และที่ค่าความเร็วรอบน้อยกว่าความเร็วรอบที่ทำให้กำลังขาออกสูงสุด กำลังขาออกมีค่าลดลงเช่นกัน เพราะกำลังปั๊มที่มีค่าน้อย และมีกำลังขาออกสูงสุดเป็น 0.022 W ที่ความเร็วรอบ 54 rpm ในทางตรงกันข้าม จะพบว่ากำลังปั๊มซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกำลังปั๊มซึ่งจะแปรผันตรงกับความเร็วรอบ

จากการทดลอง ได้ให้กำลังขาเข้าเป็น 34.4 W จะได้ประสิทธิภาพรวมสูงสุดของชุดการทดลองเป็น 0.0646% ซึ่งจากการวิเคราะห์และคำนวณ พบว่ากำลังงานที่หายไปส่วนใหญ่เกิดจากการส่งผ่านความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้ามายังเครื่องยนต์ ถึงกว่า 75% และได้สรุปรายละเอียดอื่นๆ สำหรับทุกชุดข้อมูลการทดลองทั้งกำลังขาออกของเครื่องยนต์ และประสิทธิภาพสูงสุดแบบต่างๆ ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 7 ถึง 11 ไว้ในตารางที่ 3

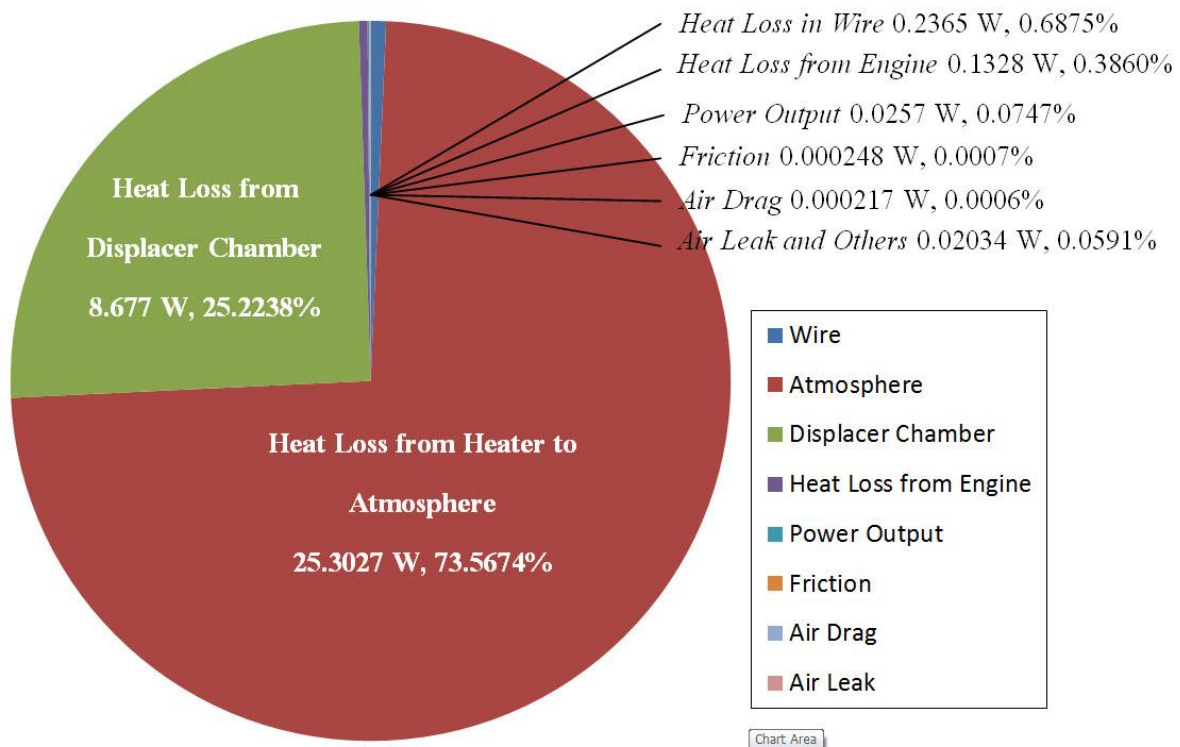
ตารางที่ 3 รายละเอียดของชุดทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาขนาดเล็ก

ข้อมูล	รายละเอียด
สารทำงาน	อากาศ
ปริมาตรกวาดตัวด้าน compression	$6.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
ปริมาตรกวาดตัวด้าน expansion	$1.66 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
มุมต่างเฟส	90°
ความดันเฉลี่ยในระบบ	1.23 bar
ผลต่างของอุณหภูมิที่เครื่องยนต์เริ่มทำงาน	63.8°C
ขีดจำกัดอุณหภูมิด้านร้อนของเครื่องยนต์	180°C
กำลังขาออกสูงสุดที่อุณหภูมิทำงานที่กำหนด $120^\circ\text{C}/132^\circ\text{C}/148^\circ\text{C}$	0.016 W at 41 rpm / 0.018 W at 48 rpm / 0.022 W at 54 rpm
ประสิทธิภาพรวมสูงสุดของชุดทดลองที่อุณหภูมิทำงานที่กำหนด $120^\circ\text{C}/132^\circ\text{C}/148^\circ\text{C}$ (สมการที่ 7)	0.056% at 41 rpm / 0.055% at 48 rpm / 0.060% at 54 rpm
ประสิทธิภาพรวมสูงสุดเทียบกำลังขาเข้าทางกลทางทฤษฎีที่อุณหภูมิ $120^\circ\text{C}/132^\circ\text{C}/148^\circ\text{C}$ (สมการที่ 8)	15.0% at 37 rpm / 14.1% at 45 rpm / 11.0% at 54 rpm
ประสิทธิภาพเฉลี่ยของฮีตเตอร์ที่อุณหภูมิทำงานที่กำหนด $120^\circ\text{C}/132^\circ\text{C}/148^\circ\text{C}$ (สมการที่ 9)	20.8% / 19.9% / 18.9%
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีที่อุณหภูมิทำงานที่กำหนด $120^\circ\text{C}/132^\circ\text{C}/148^\circ\text{C}$ (สมการที่ 10)	20.3% / 20.3% / 25.8%
ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือประสิทธิภาพเชิงกลสูงสุดที่อุณหภูมิทำงานที่กำหนด $120^\circ\text{C}/132^\circ\text{C}/148^\circ\text{C}$ (สมการที่ 11)	71.1% at 37 rpm / 63.6% at 45 rpm / 54.1% at 54 rpm

6. สรุป

การสร้างและทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาขนาดเล็กได้ผลลัพธ์ตรงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถวัดกำลังขาออก และประสิทธิภาพแบบต่างๆ และเปรียบเทียบกับการคำนวณจาก Schmidt Analysis โดยเครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นมีกำลังขา

ออกสูงสุด 0.022 W ที่ความเร็วรอบ 54 rpm มีประสิทธิภาพรวมของชุดการทดลองสูงสุด 0.0646% ที่ความเร็วรอบ 54 rpm และสามารถวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียสูงสุดซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนที่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าสู่บรรยากาศโดยมีค่าเป็น 75% ของกำลังของทั้งระบบ และในส่วนของกำลังสูญเสียอื่นๆ ได้แสดงไว้ใน Pie Chart รูปที่ 13 และน้ำหนักถ่วงไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลง ทำให้การวัดค่าแรงบิดมีความแม่นยำสูง



รูปที่ 13 Pie Chart แสดงสัดส่วนกำลังสูญเสียต่างๆ และกำลังขาออกของระบบ

ทั้งนี้ มีคำแนะนำเพิ่มเติมสำหรับการวิจัยในอนาคตคือ (1) เนื่องจากความร้อนที่สูญเสียของชุดทดลองอยู่ที่ฮีตเตอร์ถึง 80% ควรแก้ปัญหาด้วยการหุ้มฉนวนความร้อนที่ด้านข้างฮีตเตอร์ และจัดวางเครื่องยนต์กับฮีตเตอร์ให้แนบติดกันมากที่สุด เพื่อลดความร้อนที่สูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพรวมของเครื่องยนต์ และทำร่องที่ผิวด้านนอก Bottom Plate เพื่อเป็นช่องสำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเครื่องยนต์และฮีตเตอร์แนบชิดกัน; (2) ควรเลือกใช้ภาชนะที่ใส่ตุ้มเหล็กที่มีรูปร่างเรียวยาว เพื่อลดการปะทะจากแรงลมภายนอกซึ่งทำให้ค่าแรงดึงเชือกคลาดเคลื่อน และเลือกใช้รอกที่มีความเสียดทานต่ำ เพื่อให้แรงเสียดทานจากตุ้มน้ำหนักส่งมาถึงล้อตุ้มกำลังทั้งหมด; และ (3) ควรลดระยะเผื่อระหว่างลูกสูบกำลังและกระบอกสูบ เพื่อลดการรั่วไหลของสารทำงาน โดยการสร้างลูกสูบกำลังควรมีความละเอียดและเที่ยงตรงสูง และออกแบบล้อตุ้มกำลังให้มีโมเมนต์ความเฉื่อยมากขึ้น เพื่อให้ล้อตุ้มกำลังเก็บพลังงานได้มากขึ้น จะทำให้เครื่องยนต์หมุนอย่างราบเรียบ นอกจากนั้นควรเปลี่ยนวัสดุของลูกสูบไล่ให้สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ ทำให้ขีดจำกัดของอุณหภูมิด้านร้อนของเครื่องยนต์สูงขึ้น และสามารถเพิ่มช่วงการเก็บข้อมูลได้ และออกแบบกระบอกลูกสูบไล่ให้บางลง เพื่อลดความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนที่กระบอกลูกสูบไล่ และทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิสารทำงานที่ด้านร้อนและด้านเย็นมากขึ้น และหุ้มฉนวนรอบกระบอกลูกสูบไล่

บรรณานุกรม

- [1] อธิพิพล ญาณวารี และ อังคีร์ ศรีภคกร, “การศึกษาการนำระบบทำความเย็นแบบสเตอร์ลิงมาใช้ในยานยนต์,” presented at การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, 15-17 ตุลาคม 2551, รหัส TSF020.
- [2] I. Younas. (2010) *Stirling Engines Overview* [Online]. Available: <http://www.irfanworld.com/energy/stirling/stirling-overview.php>
- [3] ไพบุญย์ ศรีภคกร และ จิตรกร ศรีสายชล, “การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาจากเครื่องอัดอากาศ,” presented at การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, แม่นาคาริน โกลด์เน่ วอลล์ ไฮเทค แอนด์ รีสอร์ท, นครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2549, รหัส TSF041.
- [4] ปิติพงษ์ นิยมบัณฑิต และ ธนพัฒน์ เดวีฒตานนท์, “การออกแบบและสร้างชุดสาธิตเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก,” รายงานโครงการทางวิศวกรรมเครื่องกล ปีการศึกษา 2552, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [5] ดนุพงษ์ สรรพอุดม และ ปกรณ์ ทองระย้า, “การออกแบบและสร้างชุดทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาขนาดเล็ก,” รายงานโครงการทางวิศวกรรมเครื่องกล ปีการศึกษา 2553, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [6] มาลูน วงศ์สวัสดิ์, มูทิตา ศิริวิชตานนท์, เยาวนิสร์ เครือเทศน์, และ วัชร เดโชพลชัย, “การออกแบบทดลองและพัฒนา ระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง,” รายงานโครงการทางวิศวกรรมเครื่องกล ปีการศึกษา 2554, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [7] Koichi Hirata. (1997). *Schmidt theory for Stirling Engines* [Online]. National Maritime Research Institute. Available: <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/schmidt/schmidt.htm>

