



การศึกษาและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาโดยแหล่งความร้อนจากกระบวนการแก๊สปิโตรเลียมเหลว

ชนพล สุขนิ่ม และ กิติพงษ์ เจาจาริก*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1374 2507 อีเมล: kitipong.j@ku.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.04.013

รับเมื่อ 16 กันยายน 2562 แก้ไขเมื่อ 25 ตุลาคม 2562 ตอรับเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 24 เมษายน 2563

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบ โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถรับแหล่งความร้อนได้หลากหลายแหล่งเพราะเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอก งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา โดยใช้หลักการสมการวิเคราะห์และสมมติฐานของเบลล์นัมเบอร์ในการประมาณค่าขนาดของเครื่องยนต์ในส่วนการออกแบบความแข็งแรงของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ได้ทำการวิเคราะห์แรงและความแข็งแรงของวัสดุด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA; Finite Element Analysis) โดยใช้โปรแกรม Top Solid ขณะที่การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุได้ใช้โปรแกรม CFD (Computational Fluid Dynamics) เข้ามาช่วย ทั้งนี้ได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความดันสารทำงานภายในด้านร้อนและเย็น อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์หากำลังเครื่องยนต์ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อากาศเป็นสารทำงาน และมีความดันสมบูรณ์เริ่มต้นภายในเท่ากับ 1 บาร์ ในการให้ความร้อนกับเครื่องยนต์ได้ใช้หัวเผาก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นแหล่งให้ความร้อน ทั้งนี้ ได้ทำการศึกษาโดยการปรับเปลี่ยนแหล่งความร้อนที่ให้กับสารทำงานภายในด้านร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 326–448 องศาเซลเซียส และกระบอกด้านเย็นมีอุณหภูมิประมาณ 35.75–37.75 องศาเซลเซียส และยังทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อดูผลกระทบที่มีต่อกำลังงาน ผลการทดลองพบว่า เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สร้างขึ้นมีความเร็วรอบเครื่องยนต์ประมาณ 272 รอบต่อนาที อุณหภูมิสารทำงานภายในด้านร้อน 368 องศาเซลเซียส Flow ของน้ำหล่อเย็น 2 ลิตรต่อนาที และได้กำลังจากพื้นที่ไดแกรม P – V Diagram เท่ากับ 3.02 วัตต์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความดันในฝั่งด้านร้อนและด้านเย็นเพื่อหากำลังบ่งชี้ (Indicated Power) พบว่า หากวิเคราะห์ความดันเพียงฝั่งเดียวผลที่ได้อาจจะคลาดเคลื่อนไปได้มากกว่า 10%

คำสำคัญ: การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง การวิเคราะห์แรง



Study and Development of Gamma Stirling Engine by Heat Source from Liquefied Petroleum Gas Process

Thanaphon Suknim and Kitipong Jaojaruek*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Kamphaengsaen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1374 2507, E-mail: kitipong.j@ku.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.04.013

Received 19 September 2019; Revised 25 October 2019; Accepted 9 November 2019; Published online: 24 April 2020

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research is a study and development of a Stirling engine prototype. Since this type of engine is an external combustion type, it can get a variety of heat sources. The design and the construction of Stirling engine prototype was based on the principle of equation analysis and Belle Number hypothesis to estimate the size of the engine. In determining the strength of materials by finite element method (FEA; Finite Element Analysis), Top Solid program was used. While the analysis of the material's heat transfer, the CFD program (Computer Fluid Dynamics) was used to measure the various parameters which are the working pressure inside the hot and cold side, heat source temperature at various locations, angular velocity angular acceleration, and the coolant flow rate to help analyze the engine power. Air is used as working substance with an absolute internal pressure equal to 1 bar. In heating the engine, Liquefied Petroleum Gas (LPG) burners are used as heat source. This study was conducted by with the heat with to the working substance inside the hot side with the temperature around 326–448 degrees celsius and the cold side cylinder with with temperature of 35.75–37.75 degrees celsius. The flow rate of cooling water was also adjusted to see the effect on the work force. The results showed that the developed Stirling engine reached the engine speed of approximately 272 rpm, the temperature of the working substance inside the hot side was 368 degrees celsius, the flow of coolant was 2 lpm and the power from the area under the P – V Diagram graph was 3.02 W. In this research, the pressure in the hot and cold side were analyzed to find the Indicated Power and can be concluded that if only one side of the pressure is analyzed, the result may be more than 10% deviation.

Keywords: Stirling Engine Design, Force Analysis

Please cite this article as: T. Suknim and K. Jaojaruek , “Study and development of gamma Stirling engine by heat source from liquefied petroleum gas process,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 3, pp. 454–464, Jul.–Sep. 2020 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิต และเศรษฐกิจของมนุษย์ การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและอิทธิพลการใช้ชีวิตของผู้คนในยุคปัจจุบัน จากงานวิจัยพบว่า การใช้ไฟฟ้าภายในประเทศไทยในรอบ 5 ปี มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น [1] จึงทำให้มีความต้องการพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น แต่พลังงานภายในโลกมีอยู่อย่างจำกัด ทำให้เกิดปัญหาการลดลงของพลังงานอย่างต่อเนื่อง แนวทางแก้ไขปัญหาคือ การหาพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทนเข้ามาช่วย ในการผลิตกระแสไฟฟ้าภายในประเทศไทยมีการนำเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ นำมาใช้ในการผลิต [1] การนำพลังงานทางเลือกหรือพลังงานหมุนเวียนมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าสามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในนั้นคือการนำเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมาใช้ โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถรับความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้และยังสามารถรับแหล่งพลังงานความร้อนได้หลากหลายชนิด เช่น พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานชีวมวล เป็นต้น เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกประเภทหนึ่งที่มีความสามารถในการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานต้นกำลังได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกของโลกในปี ค.ศ. 1816 โดยโรเบิร์ต สเตอร์ลิง บาทหลวงชาวสก็อต โดยได้ประดิษฐ์เครื่องยนต์วัฏจักรปิดขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการระเบิดของเครื่องจักรไอน้ำและได้รับการจดสิทธิบัตรเครื่องยนต์อากาศร้อนในชื่อ The Stirling Air Engine and the Heat Exchanger or Economizer (Patent No. 4081) ภายหลังจากถูกเรียกในชื่อ เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ในขณะนั้นนิยมนำเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมาใช้ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ [2]

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในยุคเริ่มแรกจะมีขนาดเล็ก และกำลังต่ำ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1853 John Ericsson สร้างเครื่องยนต์อากาศร้อน (Hot Air Engine) ขนาดใหญ่ขึ้นมากสามารถผลิตกำลังได้ถึง 220 กิโลวัตต์ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 9 รอบต่อวินาที [3] ในยุคต่อมาได้ทำการศึกษา

ทางด้านความร้อน และการไหลภายในเครื่องยนต์ได้ทดลองเปลี่ยนวัสดุในการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้วัสดุคือ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) มีกำลังเครื่องยนต์มากกว่า 30 เท่าตัว ของเครื่องยนต์รุ่นเก่า [4] เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีการนำความร้อนที่ดี มีความแข็งแรงสูง และมีจุดหลอมละลายของวัสดุที่สูง เมื่อมาถึงยุคปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีงานวิจัยที่ได้ทำการเปลี่ยนสารทำงานจากอากาศเป็นไฮโดรเจน ที่มีข้อดีคือ มีน้ำหนักเบาและสามารถระบายความร้อนได้ดี [5]

โดยประเทศไทยมีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงน้อยมากเมื่อเทียบกับต่างประเทศ (www.thailis.or.th, 24 มีนาคม 2562) โดยงานวิจัยต่างๆ มีทั้งการนำเครื่องยนต์มาประยุกต์ใช้ การออกแบบเครื่องยนต์ และทำการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง นอกจากนี้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ทำการออกแบบ และสร้างภายในประเทศไทยมีขนาดไม่เกิน 1600 ซีซี [5] และมีความเร็วรอบที่ต่ำกว่า 200 รอบต่อวินาที ทำให้ได้กำลังเครื่องยนต์ที่ต่ำ ทั้งนี้ งานวิจัยด้านการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาสามารถใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า ก๊าซ LPG และ Biomass เป็นแหล่งความร้อนให้กับเครื่องยนต์ [7] การวัดกำลังเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำได้หลายวิธี เช่น เชือกเบรกวัดแรงบิดของเครื่องยนต์ การใช้ตาชั่งสปริงมาแขวนแล้วนำเชือกมาคล้องกับล้อต้นกำลัง เป็นต้น [8]

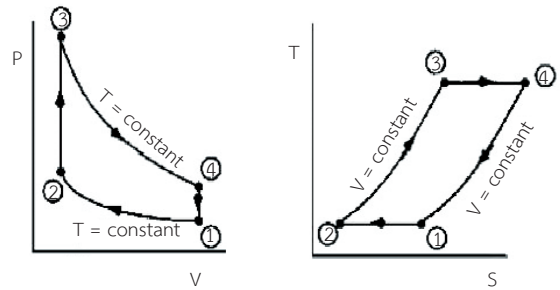
ซึ่งการนำเครื่องยนต์ชนิดนี้มาใช้จะช่วยลดการเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถนำแหล่งความร้อนจากทรัพยากรหมุนเวียนมาใช้ในการให้ความร้อน เป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรโลกได้อย่างยั่งยืน

โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ และหลักการการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา โดยทำการออกแบบ และสร้างเครื่องยนต์ต้นแบบขึ้น ในการออกแบบความแข็งแรงของวัสดุ และการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุได้ใช้เครื่องมือช่วยของโปรแกรม Top Solid และ CFD (Computational Fluid Dynamics) มาช่วยทำการวิเคราะห์การออกแบบ ทั้งนี้ ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบวัด และระบบเก็บข้อมูล

เพื่อที่จะสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ ในส่วนของงานวิจัยได้ทำการศึกษาดูพารามิเตอร์โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิแหล่งความร้อนให้กับเครื่องยนต์ และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อดูผลกระทบที่มีต่อกำลังงานของเครื่องยนต์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความดันในฝั่งด้านร้อนและด้านเย็นเพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนในการหาค่ากำลังบ่งชี้ (Indicated Power) ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่ไม่ได้ทำการวัดความดันในฝั่งด้านร้อนเพราะคิดว่าทั้งระบบมีความดันเท่ากัน แต่ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะวัดความดันในฝั่งด้านร้อนเพื่อดูค่าความแตกต่างของทั้งสองฝั่งและนำข้อมูลที่ได้มาประเมินค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมามีข้อดีคือ มีอัตราการรั่วไหลต่ำ กำลังเครื่องยนต์สูง และมีสมรรถภาพที่ดี งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาขึ้น โดยใช้ทฤษฎีจากสมการของเบลล์นัมเบอร์ มาช่วยในการหาขนาดของเครื่องยนต์ และทำการเขียนแบบไดอะแกรมเครื่องยนต์ขึ้น ในการออกแบบความแข็งแรงของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ได้ทำการวิเคราะห์แรง และความแข็งแรงของวัสดุที่จะใช้ในการสร้างเครื่องยนต์ ซึ่งการวิเคราะห์แรงทำโดยใช้โปรแกรมช่วยออกแบบและวิเคราะห์ (CAD; Computer Aid Design & CAE; Computer Aid Engineering) ในส่วนการวิเคราะห์ความแข็งแรงทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA; Finite Element Analysis) จะใช้เครื่องมือของโปรแกรม Top Solid ขณะที่การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุ และความสามารถในการระบายความร้อนที่เหมาะสมได้ใช้โปรแกรม CFD (Computational Fluid Dynamics) เข้ามาช่วย ทั้งนี้จะนำชิ้นส่วนที่ออกแบบสมบูรณ์แล้วมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน โดยได้ใช้เครื่องกลึงในการขึ้นรูปชิ้นงาน และทำการประกอบเครื่องยนต์ ในการทดสอบเครื่องยนต์ได้พัฒนาระบบวัดและบันทึกข้อมูล (Data Monitor and Logging System) ขึ้นมา และได้ทำการออกแบบและประกอบวงจรไฟฟ้าของระบบวัด (Electrical and Instrument Circuit) โดยได้ใช้ Controller Arduino (Mega 2560) บอร์ดมาเป็น



รูปที่ 1 กราฟแสดง P-V และ T-S ของวัฏจักรสเตอร์ลิง

ตัวประมวลผล และทำการเขียนโปรแกรมเก็บค่าและสั่งการต่างๆ ของระบบ ในการทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อหาประสิทธิภาพและกำลังของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยน เช่น อุณหภูมิของตัวรับความร้อน อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์

1.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

หลักการทำงานของเครื่องยนต์ เมื่อให้ความร้อนที่ส่วนรับความร้อน จะทำให้สารทำงานภายในเกิดการขยายตัวขึ้น เนื่องจากความร้อน และมีความดันภายในเพิ่มขึ้น โดยมุมระหว่างลูกสูบไล่ และลูกสูบกำลังคือ 90 องศาเซลเซียส โดยลูกสูบไล่จะนำลูกสูบกำลังอยู่ เมื่อภายในระบบมีความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ลูกสูบไล่เคลื่อนที่และทำให้กลไกการทำงานเคลื่อนที่ตามกันไป เมื่อสารทำเคลื่อนที่จากกระบอกสูบไล่ไปกระบอกสูบกำลังจะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนที่รีเจนเรเตอร์

1.2 วัฏจักรสเตอร์ลิง

วัฏจักรสเตอร์ลิง [6] ประกอบด้วย 4 กระบวนการแสดงดังรูปที่ 1

กระบวนการ 1-2 กระบวนการอัดแบบอุณหภูมิคงที่ กระบวนการนี้ทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้ เนื่องจากลูกสูบกำลังอยู่ตำแหน่งศูนย์ตายล่างต้องการให้เคลื่อนที่ไปตำแหน่งศูนย์ตายบนโดยใช้ Flywheel ช่วยในการเคลื่อนที่ในกระบวนการนี้ ความร้อนที่เหลือภายในระบบจะถูกระบายออกสู่ Cooler

ด้านนอกทั้งหมด

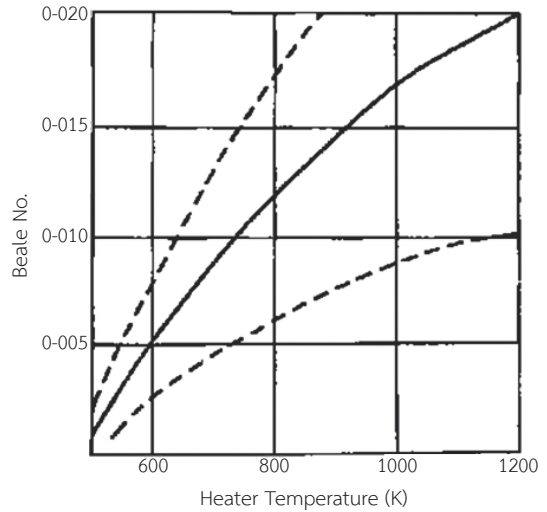
กระบวนการ 2-3 กระบวนการให้ความร้อนแบบ ปริมาตรคงที่ กระบวนการนี้สารทำงานจากด้านเย็นจะถูก ผลักดันไปสู่ด้านร้อนโดยอุณหภูมิของสารทำงานจากอุณหภูมิ ต่ำ เมื่อผ่านรีเจเนอเรเตอร์ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าทำให้มีการ ถ่ายเทความร้อนจากรีเจเนอเรเตอร์ให้กับสารทำงาน จึงทำให้ สารทำงานมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการ ปริมาตรคงที่ จึงไม่เกิดงาน

กระบวนการ 3-4 กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิ คงที่ กระบวนการนี้เมื่อสารทำงานไหลไปสู่ด้านร้อนทั้งหมด และ มีการให้ความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอก ทำให้เกิด การขยายตัวของลูกสูบได้ และเกิดความดันขึ้นภายในระบบ จึงทำให้ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบนไปยังศูนย์ตายล่าง โดยกำลังส่วนหนึ่งจะถูกแบ่งไว้ที่ล้อตุนกำลัง (Flywheel) ดังนั้นกระบวนการนี้เป็นกระบวนการทำให้เกิดงานแก่ระบบ โดยพลังงานกลที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในวัฏจักร และสามารถหางานได้จากพื้นที่ใต้กราฟของกระบวนการนี้

กระบวนการ 4-1 กระบวนการระบายความร้อนแบบ ปริมาตรคงที่ กระบวนการนี้ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ไปยังศูนย์ตาย ล่าง และได้ส่งกำลังส่วนหนึ่งไปยัง Flywheel เพื่อที่จะใช้ โมเมนตัมของ Flywheel เคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่างไปยังศูนย์ ตายบน โดยกระบวนการนี้ความร้อนจากสารทำงานจะถูกถ่ายเท มาเก็บไว้ที่รีเจเนอเรเตอร์ ทำให้อุณหภูมิของสารทำงานจาก อุณหภูมิสูงสุดลดลงมาที่อุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิที่เหลืออยู่ จะถูกระบายความร้อนออกที่ Cooler ต่อไปในกระบวนการนี้ เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่

1.3 ทฤษฎีของเบลล์นัมเบอร์

การประมาณกำลังของเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ ทฤษฎีของเบลล์นัมเบอร์ โดยตัวแปลเบลล์นัมเบอร์ (Beale Number) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ทางด้านอุณหภูมิ ด้านร้อนของเครื่องยนต์และสามารถหาค่าได้จากกราฟ ด้านล่าง เนื่องจากเส้นปะบนสุดคือ ประสิทธิภาพสูงสุด เส้นทึบ ตรงกลางคือ ประสิทธิภาพปานกลาง และเส้นปะล่างสุดคือ ประสิทธิภาพต่ำสุด แสดงกราฟดังรูปที่ 2 โดยสามารถหา



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิด้านร้อน และเบลล์นัมเบอร์

กำลังเครื่องยนต์จากทฤษฎีของเบลล์นัมเบอร์ได้ ดังสมการ ที่ (1) [3]

$$P = N_b p f V_0 \quad (1)$$

เมื่อ

P คือ กำลังของเครื่องยนต์ (วัตต์)

N_b คือ เบลล์นัมเบอร์

p คือ ความดันเฉลี่ยของเครื่องยนต์ (บาร์)

f คือ ความถี่ของเครื่องยนต์ (เฮิร์ตซ์)

V_0 คือ ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง (ลบ.ซม.)

1.3.1 ทฤษฎีการหาลูกสูบกำลังเครื่องยนต์

1.3.1.1 กำลังบ่งชี้

กำลังบ่งชี้ เป็นกำลังที่ก๊าซในกระบอกสูบถ่ายเทไปยัง ลูกสูบ สามารถหาลูกสูบกำลัง บ่งชี้ ดังสมการที่ (2)

$$P = n W_{tot} \quad (2)$$

เมื่อ

n คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ มีหน่วยเป็น เฮิร์ตซ์

W_{tot} คือ หนึ่งรอบวัฏจักรการทำงาน (หามาจากพื้นที่ใต้กราฟของ P-V Diagram) มีหน่วยเป็น จูล

1.3.1.2 ประสิทธิภาพเชิงกล (Mechanical Efficiency; η_m) สามารถหาได้ ดังสมการที่ (3)

$$\eta_m = \frac{P_B}{P} \times 100 \quad (3)$$

1.3.2 ขนาดและปริมาตรของชิ้นส่วนต่างๆ

ตารางที่ 1 ขนาดและปริมาตรของชิ้นส่วนต่างๆ

| | |
|--------------------------------|------------|
| ปริมาตรกระบอกสูบกำลัง | 60 ลบ.ซม. |
| ปริมาตรรวมกระบอกสูบไต่ | 329 ลบ.ซม. |
| เส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบกำลัง | 40 มม. |
| เส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบไต่ | 46 มม. |
| ความยาวกระบอกสูบกำลัง | 100 มม. |
| ความยาวกระบอกสูบไต่ | 198 มม. |

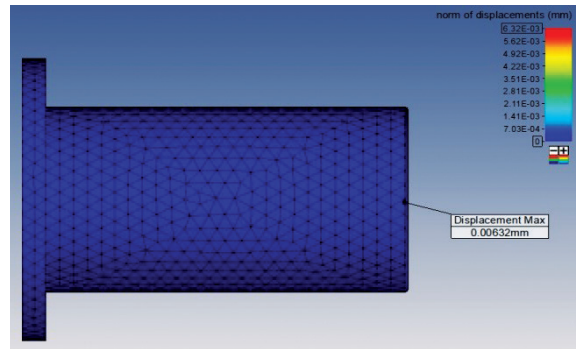
จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงปริมาตรของชิ้นส่วนต่างๆ ของงานวิจัยนี้ โดยจะพบว่า ปริมาตรส่วนกระบอกสูบไต่จะมีปริมาตรมากที่สุด

2.2 วิธีการวิจัย

2.1 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุ

การออกแบบและการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ได้ใช้ Tool ในการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Top Solid ช่วยในการออกแบบ และคำนวณแรงที่กระทำกับชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ เช่น ส่วนรับความร้อน ส่วนระบายความร้อน ลูกสูบกำลัง ลูกสูบไต่ เป็นต้น การวิเคราะห์ความแข็งแรงในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความดันภายใน 1.5 บาร์ อุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ 20 องศาเซลเซียส ตัวอย่างการวิเคราะห์ส่วนรับความร้อนมีค่า ดังรูปที่ 3 และผลการวิเคราะห์แรงแสดงดังตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 ทำให้ทราบว่าวัสดุและรูปทรงที่ทำการออกแบบสามารถรับความดันที่ใช้ในการทดลองได้และไม่เสียหาย



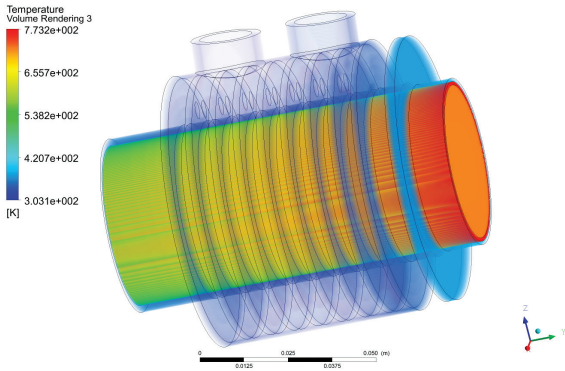
รูปที่ 3 การวิเคราะห์แรงทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของส่วนรับความร้อน

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของส่วนรับความร้อน

| | |
|----------------------|--------------------|
| วัสดุ | สแตนเลส 304L |
| ความดันภายใน | 1.5 บาร์ |
| Node | 18,219 |
| Element | 9,371 |
| Young modulus | 210,000 เมกะปาสคาล |
| Yield Strength | 205 เมกะปาสคาล |
| Principales Stresses | 12.4 เมกะปาสคาล |
| Tresca Stresses | 12.4 เมกะปาสคาล |
| Von Mises | 12.4 เมกะปาสคาล |

2.2 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

การออกแบบส่วนระบายความร้อนเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ เพราะต้องออกแบบให้ระบายความได้ทันไม่เช่นนั้นจะทำให้เครื่องยนต์หยุดทำงานเนื่องจากอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นเท่ากัน โดยวัสดุที่จะนำมาใช้ทำหน้าที่ระบายความร้อนต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของค่าการนำความร้อน และความแข็งแรงของวัสดุ โดยงานวิจัยนี้เลือกวัสดุที่ใช้ในการระบายความร้อนเป็นอะลูมิเนียม เพราะสามารถระบายความร้อนได้ดีเนื่องจากมีค่าการนำความร้อนที่สูง และมีความแข็งแรง โดยสามารถคงทนต่อแรงดันภายในระบบได้เป็นอย่างดี โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำช่วยในการหล่อเย็นระบบมีอัตราการไหล Flow อยู่ที่ 2-6 ลิตรต่ออนาที ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนได้



รูปที่ 4 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

ใช้เครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ของโปรแกรม CFD (Ansys CFX) แสดงดังรูปที่ 4

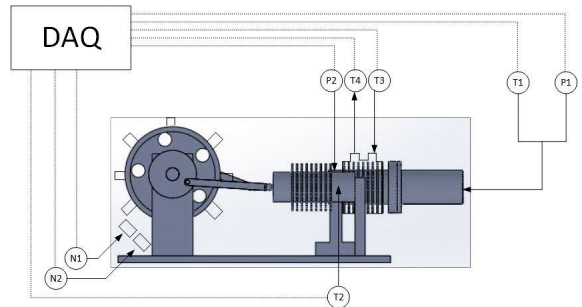
จากตารางที่ 3 พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของ ส่วนระบายความร้อนสามารถระบายออกมาได้ 620.9 วัตต์ ที่อุณหภูมิภายในด้านร้อนเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ทาง CFD ของส่วนระบาย ความร้อน

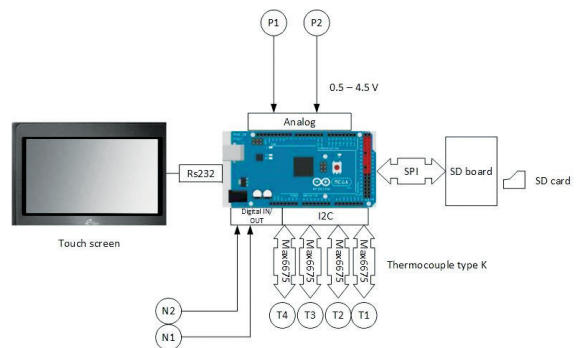
| วัสดุ | อะลูมิเนียม |
|---|-----------------------------------|
| Nodes | 13,649,356 |
| Elements | 7,184,865 |
| อัตราการไหลอากาศ | 0.004 กิโลกรัมต่อวินาที |
| ความเร็วน้ำหล่อเย็น | 3 เมตรต่อวินาที |
| อุณหภูมิภายในด้านร้อน | 500 องศาเซลเซียส |
| อุณหภูมิน้ำเข้า | 30 องศาเซลเซียส |
| สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ภายใน (อากาศ) | 179.05 วัตต์ต่อตารางเมตร เคลวิน |
| สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ภายนอก (น้ำ) | 14,606.6 วัตต์ต่อตารางเมตร เคลวิน |
| อัตราการถ่ายเทความร้อนออกนอกระบบ | 620.9 วัตต์ |

2.3 ระบบวัดและเก็บข้อมูล

จากรูปที่ 5 แสดงตำแหน่งของเซนเซอร์ต่างๆ โดยมี อุปกรณ์ควบคุมและสั่งการคือ Data Acquisition (DAQ) โดย



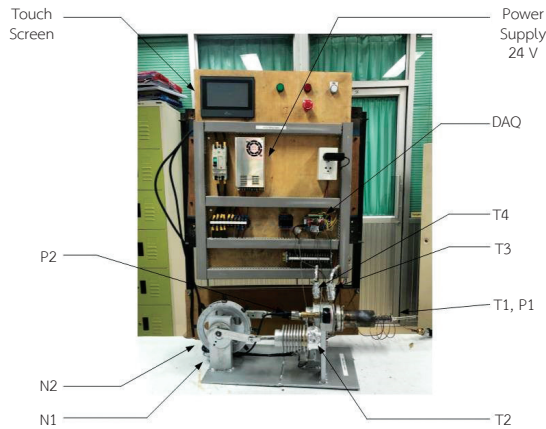
รูปที่ 5 ตำแหน่งเซนเซอร์กับอุปกรณ์ควบคุม



รูปที่ 6 แบบ Diagram ไฟฟ้ากับอุปกรณ์ต่างๆ

DAQ จะทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลต่างๆ เพื่อนำข้อมูลไปประมวลผลออกมาเป็นค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ต่างๆ ในส่วน การเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ทำการเก็บค่าการเคลื่อนที่ ที่ทุกการหมุน 45 องศา ของ Flywheel หมายความว่า จะทำการเก็บค่าทุกตัวแปรอ้างอิงกับมุมการเคลื่อนที่ของ Flywheel ทุก 45 องศา ดังนั้นจะเห็นว่าใน 1 รอบการหมุน จะทำการเก็บค่าทั้งหมด 8 ครั้ง

โดยรูปที่ 6 แสดงแบบการต่อวงจรไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้คอนโทรลเลอร์ของ Arduino Mega 2560 ในการ มาประมวลผลและสั่งการต่างๆ โดยในการสื่อสารระหว่าง คอนโทรลเลอร์กับจอ Touch Screen สื่อสารในรูปแบบ RS232 Protocol และยังมีเก็บข้อมูลต่างๆ จากเซนเซอร์ โดยใช้ SD Board มาเป็นตัวเก็บข้อมูล ในการสื่อสารระหว่าง SD Board กับคอนโทรลเลอร์ สื่อสารในรูปแบบ SPI ในส่วน ของเซนเซอร์ Thermocouple Type k สื่อสารในรูปแบบ I2C และส่วนเซนเซอร์วัดความดันภายในระบบได้ทำการต่อ



รูปที่ 7 เครื่องยนต์สแตนด์ลิ่งแบบแกมมาพร้อมติดตั้งเซนเซอร์ตามตำแหน่งต่างๆ

เซนเซอร์เข้ากับฝั่ง Analog ของบอร์ด และในการวัดความเร็วรอบเครื่องยนต์ได้ต่อเข้ากับฝั่ง Digital Input

ในการเก็บผลการทดลองได้ทำการเก็บผลการทดลองลงใน SD Card และยังสามารถดูค่าต่างๆ จากจอ Touch Screen ได้แบบ Real Time ไปพร้อมกับการเก็บค่าผลการทดลอง

2.4 วิธีการทดลอง

การทำงานของเครื่องยนต์เริ่มขึ้นโดยการให้ความร้อนจากก๊าซ LPG กับเครื่องยนต์สแตนด์ลิ่งโดยทำการวัดอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์ Thermocouple Type K ค่าที่อ่านได้ถูกส่งไปที่ Controller (Arduino Mega 2560) เพื่อเก็บค่าใน SD Card และ Controller จะส่งค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ไปโชว์ยังจอร์บบสัมผัส (Touch Screen) โดยเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึงค่าดังกล่าวทำการ Start เครื่องยนต์โดยการหมุนเพลาคือเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์ทำงานแล้วจะทำการเก็บค่าอุณหภูมิ ความดันภายในระบบทั้งด้านร้อนและด้านเย็น และความเร็วรอบเครื่องยนต์ ไว้ใน SD Card และสามารถสังเกตค่าต่างๆ บน Touch Screen โดยเครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นและระบบวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 7

ในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรดังต่อไปนี้

1. เริ่มต้นให้ความร้อนส่วนรับความร้อนที่ 326 องศา

เซลเซียส แล้วเก็บค่าอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง และความดันภายในทั้งด้านร้อนและเย็น โดยจะทำการปรับเปลี่ยน Flow ของน้ำหล่อเย็นเริ่มที่ 2-6 ลิตรต่อนาที

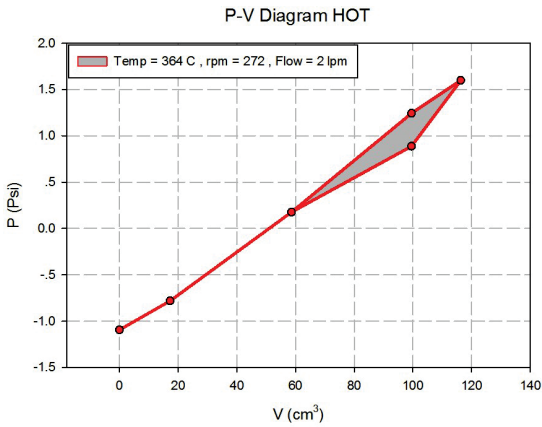
2. ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิส่วนรับความร้อนเป็น 364 องศาเซลเซียส แล้วเก็บค่าอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง และความดันภายในทั้งด้านร้อนและเย็น โดยจะทำการปรับเปลี่ยน Flow ของน้ำหล่อเย็นเริ่มที่ 2-6 ลิตรต่อนาที

3. ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิส่วนรับความร้อนเป็น 443 องศาเซลเซียส แล้วเก็บค่าอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง และความดันภายในทั้งด้านร้อนและเย็น โดยจะทำการปรับเปลี่ยน Flow ของน้ำหล่อเย็นเริ่มที่ 2-6 ลิตรต่อนาที

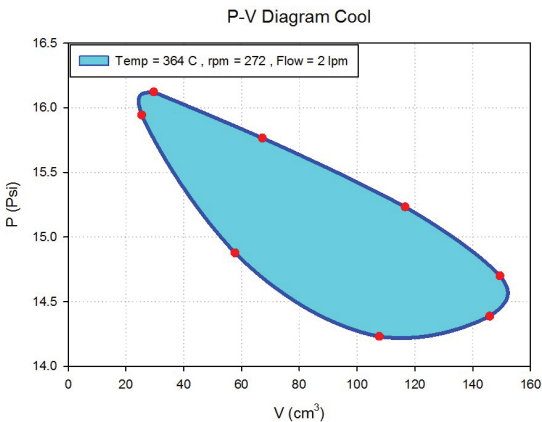
3. ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลอง และวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์ อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ให้กับเครื่องยนต์เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังเครื่องยนต์ และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ โดยในงานวิจัยนี้จะเริ่มเก็บผลการทดลองเมื่อเครื่องยนต์เข้าสู่สภาวะคงตัว หรือมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ทุกตัวแปรตัวแปรละ 1500-2000 ค่า โดยใช้ระยะเวลา 5-10 นาทีต่อการทดลองแล้วนำค่าตัวแปรต่างๆ มาเฉลี่ยกันเพื่อนำมา Plot Graph

การหาค่ากำลังเครื่องยนต์แบบไม่คิดแรงเสียดทานสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ โดยรูปที่ 8 แสดงให้เห็นความดันที่มุมต่างๆ เทียบกับปริมาตรของกระบอกสูบได้ โดยความดันที่เกิดขึ้นมีทั้งฝั่งด้านร้อนและเย็น ดังนั้นจึงต้องนำค่าที่ได้มาลบกันเพื่อนำไปหา P - V Diagram ของลูกสูบได้ และในส่วนของรูปที่ 9 แสดงให้เห็นความดันที่มุมต่างๆ เทียบกับปริมาตรของกระบอกสูบกำลัง โดยสามารถนำกราฟที่ได้จากรูปทั้งสองนี้ไปหาค่ากำลังเครื่องยนต์ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟ ผลการทดลองพบว่า กำลังที่ได้จากด้านร้อนและด้านเย็นเท่ากับ 0.35 วัตต์ และ 3.37 วัตต์ ตามลำดับ ดังนั้นกำลังบ่งชี้สุทธิ เท่ากับ 3.02 วัตต์ เนื่องจากรูปที่ 10 แสดงกำลังบ่งชี้ มีค่าเท่ากับ 3.02, 3, 3 วัตต์ ที่ Flow ของ



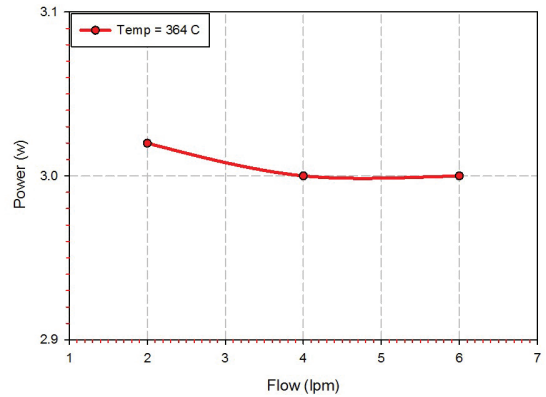
รูปที่ 8 P-V Diagram ของลูกสูบไล่



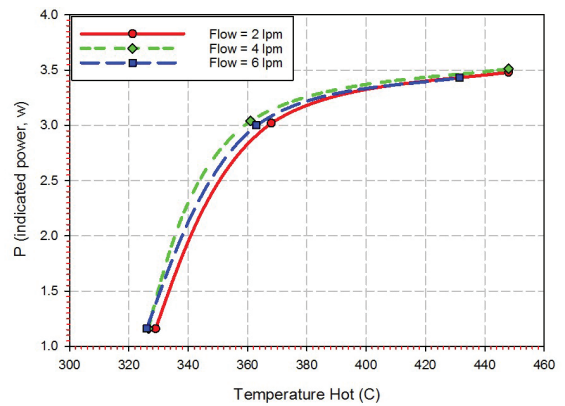
รูปที่ 9 P-V Diagram ของลูกสูบกำลัง

น้ำหล่อเย็น 2, 4, 6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยมีความเร็วรอบเครื่องยนต์ 272, 270, 270 รอบต่อนาที ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่า กำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ส่วนใหญ่มาจากแหล่งความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์หากต้องการกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์สูงขึ้นควรเพิ่มอุณหภูมิแห่งความร้อนให้มากขึ้น โดยจากรูปแสดงที่ 11 จะสรุปได้ว่าผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นมากเท่าใดจะยิ่งส่งผลต่อกำลังเครื่องยนต์มากขึ้นเท่านั้น และจากรูปพบว่า แหล่งความร้อนสูงสุดควรได้กำลังเครื่องยนต์ที่มากกว่านี้ แต่เนื่องจากความดันภายในระบบมีการรั่วไหลออกไปจึงทำให้ได้กำลังต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ทั้งนี้ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมีผลน้อยมากต่อ



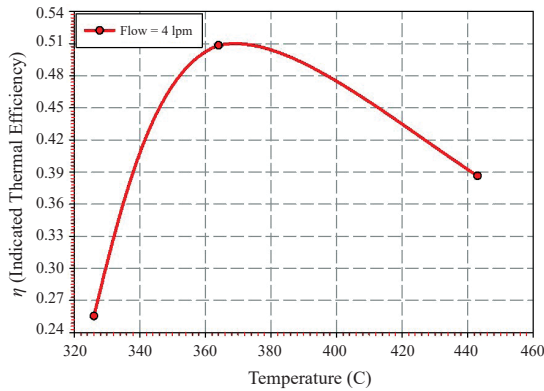
รูปที่ 10 กำลังเครื่องยนต์เทียบกับ Flow ของน้ำหล่อเย็น



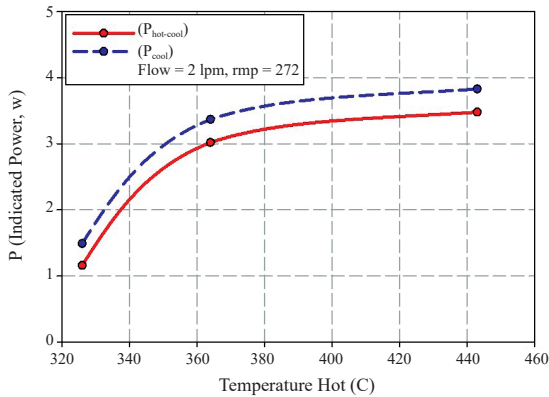
รูปที่ 11 กำลังเครื่องยนต์เทียบกับอุณหภูมิด้านร้อน

กำลังเครื่องยนต์เป็นผลมาจากอัตราการไหลเกินจุดอิ่มตัวของการระบายความร้อนไปแล้วเลยทำให้ดูเหมือนอัตราการไหลไม่ส่งผลต่อกำลังเครื่องยนต์

จากรูปจะพบว่า อุณหภูมิด้านร้อนของเครื่องยนต์สแตอริลิ่งที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นมีผลต่อประสิทธิภาพเครื่องยนต์ และปกติเครื่องยนต์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเรียกว่าจุดทำงาน หากให้ความร้อนมากเกินไปประสิทธิภาพเครื่องยนต์จะตกลง เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการรั่วไหลของสารทำงานจึงทำให้ไม่ทราบจุดทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องยนต์อยู่จุดไหน โดยจะเห็นได้ว่าในตำแหน่งอุณหภูมิของสารทำงานภายในเครื่องยนต์ที่ 364 องศาเซลเซียส จะมีประสิทธิภาพเครื่องยนต์สูงสุด และมีการหล่อเย็นเครื่องยนต์ที่ Flow 4 ลิตรต่อนาที ทั้งนี้ ที่อุณหภูมิสารทำงานด้านร้อนที่



รูปที่ 12 ประสิทธิภาพบ่งชี้เทียบกับอุณหภูมิด้านร้อนของสารทำงานภายในของเครื่องยนต์



รูปที่ 13 กำลังเครื่องยนต์ด้านเย็นกับด้านร้อนหักด้านเย็นเทียบกับอุณหภูมิ

443 องศาเซลเซียส ก็มีประสิทธิภาพเครื่องยนต์ที่ต่ำลงเป็นผลมาจากการรั่วไหลของสารทำงานภายในเครื่องยนต์ทำให้ได้กำลังน้อยกว่าที่ควรจะได้รับ ดังนั้นเครื่องยนต์ที่ทำการออกแบบ และสร้างขึ้นควรรับอุณหภูมิสารทำงานด้านร้อนอยู่ในช่วง 364 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ประสิทธิภาพเครื่องยนต์สูงสุด แสดงดังรูปที่ 12

จากรูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่า หากนำกำลังด้านเย็นมาคิดเท่านั้น ค่าที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงไป 10.4% ดังนั้นในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการคิดกำลังควรคิดฝั่งร้อนด้วย ถึงแม้ว่ากำลังจะมีค่าน้อยก็ตาม แต่หากสร้างเครื่องยนต์ขนาดใหญ่การที่มีค่าคลาดเคลื่อนมากถึง

10.4% ก็อาจทำให้เราประมาณกำลังเครื่องยนต์ที่ควรจะได้ผิดพลาดไป

4. สรุป

การทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้รับแหล่งความร้อนจากการแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในการทดสอบได้กำหนดช่วงอุณหภูมิสารทำงานภายในด้านร้อนอยู่ในช่วง 326–448 องศาเซลเซียส และในส่วนการระบายความร้อนได้กำหนด Flow ของน้ำหล่อเย็นอยู่ในช่วง 2–6 ลิตรต่ออนาที โดยผลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ยกกรณีตัวอย่างมาแสดงให้เห็น โดยกำหนดอุณหภูมิสารทำงานภายในเท่ากับ 364 องศาเซลเซียส ที่ Flow 2 ลิตรต่ออนาที พบว่า สามารถหาค่ากำลังเครื่องยนต์จาก P – V Diagram ของฝั่งด้านเย็นหักกลับด้านร้อนได้ค่าเท่ากับ 3.02 วัตต์ และสามารถหาค่ากำลังเครื่องยนต์จาก P – V Diagram ของฝั่งด้านเย็นได้ค่าเท่ากับ 3.37 วัตต์ เนื่องจากงานวิจัยนี้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถผลิตกำลังจาก P – V Diagram สูงสุดเท่ากับ 3.51 วัตต์ ที่อุณหภูมิสารทำงานภายในด้านร้อนเท่ากับ 448 องศาเซลเซียส ที่ Flow ของน้ำหล่อเย็น 4 ลิตรต่ออนาที ความเร็วรอบเครื่องยนต์เท่ากับ 311 รอบต่ออนาที โดยมีประสิทธิภาพเครื่องยนต์สเตอร์ลิงบ่งชี้เท่ากับ 0.51%

จากการทดลองพบว่า กำลังเครื่องยนต์ที่ได้ทำการออกแบบตามทฤษฎีของเบล์นัมเบอร์มีค่าเท่ากับ 1 วัตต์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากำลังบ่งชี้สุทธิของเครื่องยนต์ที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 3.02 วัตต์ โดยกำลังส่วนที่เกินมาจะต้องถูกนำไปหักกลับกับแรงเสียดทานของกลไกต่างๆ ของเครื่องยนต์ เนื่องจากงานวิจัยนี้กำลังเครื่องยนต์ส่วนหนึ่งอาจสูญเสียไปกับการรั่วไหลของสารทำงานในระบบ ทั้งนี้ เครื่องยนต์ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นมามีการรั่วไหลของสารทำงาน ดังนั้นหากยังเพิ่มอุณหภูมิด้านร้อนการรั่วไหลของสารทำงานยิ่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ศัพท์เฉพาะ

- P คือ กำลังของเครื่องยนต์ (วัตต์)
 T3 คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิน้ำเข้า
 N คือ เบลล์นัมเบอร์
 T4 คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิน้ำออก
 p คือ ความดันเฉลี่ยของเครื่องยนต์ (บาร์)
 P1 คือ เซนเซอร์วัดความดันด้านร้อน
 f คือ ความถี่ของเครื่องยนต์ (เฮิรตซ์)
 P2 คือ เซนเซอร์วัดความดันด้านเย็น
 V_0 คือ ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง (ลบ.ซม.)
 N1 คือ เซนเซอร์วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์เทียบจุดเริ่มต้น
 T_1 คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้านร้อนของสารทำงาน
 ภายใน
 T_2 คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้านเย็นของสารทำงาน
 ภายใน
 N2 คือ เซนเซอร์วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์เทียบกับตำแหน่งที่เคลื่อนที่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy, "Energy Statistics of Thailand 2018," Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, 2018.
- [2] J. G. Rizzo, *The Stirling Engine Manual*. Camden miniature steam services, 1997.
- [3] G. Walker, *Stirling Engine*. Oxford Science Publication, 1980, pp. 73–84.
- [4] C. D. West, "A historical perspective on Stirling engine performance," in *Proceedings of the 23th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1998, pp. 889004.
- [5] Buncha, "Development of a prototype double-acting Stirling engine," Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Thailand, 2011 (in Thai).
- [6] T. Kitipong, "The Stirling engine as power generator by heat source from liquefied petroleum gas processes," in *Proceedings 15th Conference on Energy Network of Thailand*, 2019, pp. 500–508 (in Thai).
- [7] H. Damirchi, G. Najafi, S. Alizadehnia, R. Mamat, C. S. Nor Azwadi, W. H. Azmi, and M. M. Noor, "Micro combined heat and power to provide heat and electrical power using biomass and Gamma-type Stirling engine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 103, pp. 1460–1469, 2016.
- [8] T. Borirak, "Design and performance test of a single Acting Gamma Stirling engine," *SWU Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 99–105, 2016.