

การศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบขนานทำงานสองด้าน

Investigations of Double Acting Parallel Cylinder Stirling Engine.

บัญชา คังตระกูล และ ไพศาล นามผล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

องครักษ์ นครนายก 26120

โทรศัพท์ (662) 02-6641000 Ext. 2055, โทรสาร 037-322609

Bancha Kongtragool and Paisarn Naphon

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

Ongkharak, Nakhornnayok 26120, Thailand

Tel: (662) 02-6641000 Ext. 2055, Fax. 037-322609

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงหลักการออกแบบและทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบทำงานสองด้าน (Double acting) ในการทำงานได้มีการออกแบบเครื่องยนต์ที่มีปริมาตร Power piston 600 ลูกบาศก์เซนติเมตรหนึ่งสูบ และ Displacer 900 ลูกบาศก์เซนติเมตรสองสูบ มีอัตราส่วนปริมาตรระหว่าง Power piston กับ Displacer 1.5:1 ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบ และน้ำเป็นสารหล่อเย็น ในการทดสอบมีการแปรเปลี่ยนภาระที่ไดนาโมมิเตอร์ แล้ววัดแรงบิดและความเร็วรอบ ผลจากการทดสอบพบว่าเครื่องยนต์ทำงานในสภาวะไม่มีการที่ความเร็วรอบสูงสุด 120 รอบ/นาที เมื่อมีภาระพบว่ามีความเร็วรอบสูงสุด 1.1 นิวตัน.เมตร ที่ความเร็วรอบ 58 รอบ/นาที และกำลังสูงสุด 6.8 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 75 รอบ/นาที

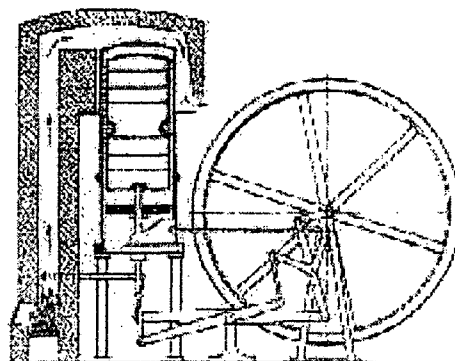
Abstract

The designed and testing of double acting stirling engine are investigated. The experimental setup is designed and constructed. The stirling engine has a volume of power piston cylinder, displacer cylinder, and the displacer to power piston volume ratio of 600, 900 cc. and 1.5:1, respectively. The LPG and water are used as fuel and coolant in this study. The torque and speed are measured. The results from the present study show that at the idle condition, the maximum speed of 130 rpm. The maximum torque is 1.0 N.m as speed of 58 rpm. The maximum power is 6.5 watts at revolution speed of 76 rpm.

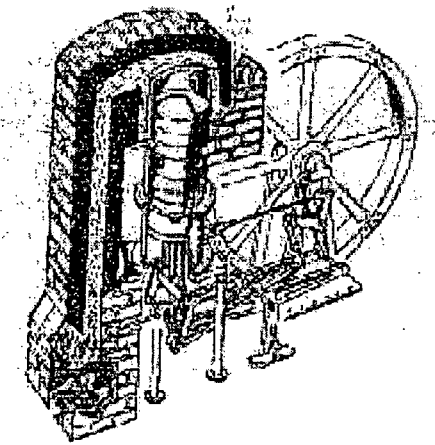
บทนำ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถูกจดสิทธิบัตรในปี ค.ศ.1816 โดย Rev. Robert Stirling ชาว สกอตแลนด์ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในยุคก่อนใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ใช้สารทำงานเป็นอากาศความดันต่ำ สร้างขึ้นมาเพื่อแข่งขันกับเครื่องจักรไอน้ำที่ทำงานด้วยไอน้ำอัดตัว เพื่อเป็นต้นกำลังช่วยสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตและเหมืองแร่

ในปี ค.ศ. 1887 John Ericsson ได้สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดใหญ่สำหรับเรือ โดยลูกสูบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.2 เมตร 4 สูบ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถูกพัฒนาไปสู่เทคโนโลยีระดับสูงโดยเริ่มต้นในคริสต์ศตวรรษ 1930 โดย Philips Research Laboratory ใน Eindhoven ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยตั้งเป้าหมายเพื่อการผลิตชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เรียบง่ายขนาดเล็กสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้หลอดสุญญากาศที่กินกำลังสูง เป้าหมายที่สำคัญของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเปลี่ยนไปสู่การผลิตกำลังไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ (Stine and Diver, 1994) และการใช้ในปัจจุบันงานกับรถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด



รูปที่ 1 แบบจดสิทธิบัตรดั้งเดิมของ Rev. Robert Stirling ในค.ศ.1816

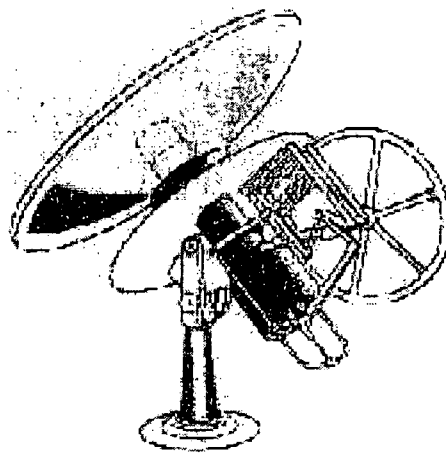


รูปที่ 2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเครื่องแรก ปี ค.ศ. 1818

ในทางทฤษฎีแล้ววัฏจักรสเตอร์ลิงสามารถเป็นวัฏจักรที่ทำให้เครื่องยนต์เปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกลได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพของวัฏจักรสเตอร์ลิงที่มี Regenerator จะเท่ากับประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนท์ ซึ่งเป็นวัฏจักรที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ทั้งหลาย (West, 1986)

ต้นแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงประดิษฐ์คิดค้นในอดีตถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับใช้กับรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบและทดสอบสำหรับใช้กับรถบรรทุก, รถโดยสารและเรือ (Walker, 1973) เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถูกนำไปใช้ขับเคลื่อนเรืออวกาศ, เรือโดยสารและยานยนต์บนถนน เช่น รถโดยสารในเมือง (Meijer, 1992) เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถูกพัฒนาเป็นต้นกำลังสำหรับเรือดำน้ำ และได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสำหรับ High-power space-borne system โดย NASA (West, 1986) เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถูกพิจารณาให้เป็นเครื่องยนต์ในอุดมคติสำหรับการใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ และการใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์รายแรกที่ถูกบันทึกไว้ก็คือโดย John Ericsson นักประดิษฐ์ชาวอเมริกัน-อังกฤษ ซึ่งย้อนไปถึงปี ค.ศ. 1864 (Rizzo, 1997)

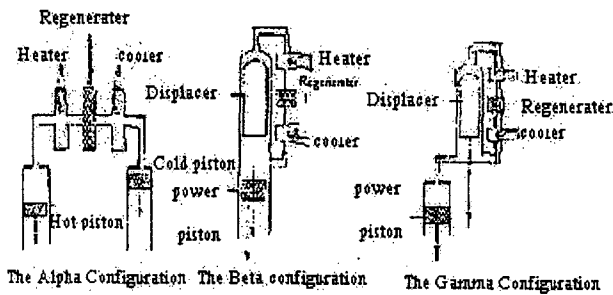
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอก ดังนั้นแหล่งความร้อนทุกชนิดสามารถใช้กับเครื่องยนต์นี้ได้ ซึ่งหมายถึงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทุกชนิด, Radioisotopes, พลังงานแสงอาทิตย์ และ Exothermic chemical reactions เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีสมรรถนะสูงจะทำงานที่ขีดจำกัดทางความร้อนของวัสดุที่ใช้สร้าง ซึ่งอยู่ระหว่าง 650 ถึง 800 °C (1200 ถึง 1470 °F) ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานของเครื่องยนต์อยู่ระหว่าง 30 ถึง 40% โดยความเร็วรอบตามปกติอยู่ระหว่าง 2000 ถึง 4000 รอบต่อนาที



รูปที่ 3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังแสงอาทิตย์ของ Ericsson

ระบบกลไกของวัฏจักรสเตอร์ลิง โครงร่างของ Power piston / Displacer ได้มีการออกแบบจัดทำขึ้นส่วนเครื่องกลต่าง ๆ มากมายเพื่อให้ได้วัฏจักรสเตอร์ลิง นั่นคือกลไกทำให้ได้การเคลื่อนที่ของก๊าซทำงานระหว่างส่วนอุณหภูมิสูงกับส่วนอุณหภูมิต่ำของเครื่องยนต์เป็นแบบปริมาตรคงที่ และการอัดตัวกับการขยายตัวที่อยู่ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนและกระบวนการระบายความร้อนเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ การอัดและการขยายตัวของวัฏจักรโดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นในกระบอกสูบ โดยใช้ลูกสูบ การเคลื่อนที่ของก๊าซทำงานไปและกลับ ผ่าน Heater, Regenerator และ Cooler โดยปริมาตรคงที่มักเกิดขึ้นโดย Displacer ในแง่นี้ Displacer ก็คือ Hollow plug อันหนึ่ง ซึ่งเมื่อเคลื่อนไปสู่ส่วนที่เย็น จะผลักดันให้ก๊าซทำงานเกิดการไหลเคลื่อนย้ายจากแหล่งเย็นไปสู่แหล่งร้อน และในทางตรงกันข้ามก็จะกลับกัน ความแตกต่างความดันที่เกิดขึ้นระหว่างแต่ละด้านของ Displacer มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นปัญหาเกี่ยวกับการกันรั่วจึงมีน้อยและแรงที่ต้องใช้เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ก็น้อยด้วย

โดยทั่วไปมีการออกแบบโครงร่างที่แตกต่างกันอยู่ 3 รูปแบบ เรียกว่าโครงร่างแบบอัลฟา, เบต้า และ แกมมา แต่ละโครงร่างมีคุณลักษณะในการออกแบบทางกลที่แตกต่างกันออกไป แต่มีวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์เหมือนกันทุกประการ โครงร่างอัลฟาใช้ลูกสูบสองลูกอยู่คนละด้านของ Heater, Regenerator และ Cooler ช่วงแรกลูกสูบทั้งสองจะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอไปในทิศทางเดียวกันเพื่อทำให้เกิดกระบวนการปริมาตรคงที่ เมื่อก๊าซทั้งหมดถูกขับเคลื่อนเข้าไปอยู่ในกระบอกสูบใดกระบอกสูบหนึ่งแล้ว ลูกสูบลูกหนึ่งจะอยู่กับที่ ส่วนลูกสูบอีกลูกหนึ่งจะเคลื่อนที่เพื่อที่จะอัดก๊าซ หรือทำให้ก๊าซเกิดการขยายตัว งานที่ใช้ในการอัดตัวจะถูกกระทำโดยลูกสูบด้านเย็น และงานที่ได้จากการขยายตัวจะกระทำกับลูกสูบด้านร้อนโครงร่างอัลฟาไม่ใช้ Displacer



รูปที่ 4 โครงร่างกลไกพื้นฐาน 3 แบบ สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

โครงร่างเบต้าคือการออกแบบที่ให้ Displacer และ Power piston อยู่ภายในกระบอกสูบเดียวกัน Displacer ขับดันก๊าซทำงานให้เคลื่อนผ่าน Heater, Regenerator และ Cooler ที่อยู่ระหว่างปลายด้านร้อนกับปลายด้านเย็นของกระบอกสูบ Power piston ซึ่งปกติอยู่ที่ปลายด้านเย็นของกระบอกสูบ จะอัดก๊าซทำงานเมื่อก๊าซอยู่ในปลายด้านเย็น และทำให้ก๊าซขยายตัวเคลื่อนที่ไปสู่ปลายด้านร้อน เครื่องยนต์ดั้งเดิมที่จดสิทธิบัตรโดยสเตอร์ลิงและเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระส่วนมากเป็นแบบโครงร่างเบต้า

อนาคตของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ข้อดีที่สำคัญของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก็คือ การให้ความร้อนเกิดขึ้นภายนอกซึ่งเราสามารถควบคุมระบบการให้ความร้อนได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูง ทำให้เครื่องยนต์ชนิดนี้ในอนาคตจะถูกนำเข้าไปใช้งานแทนที่เครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้กันอย่างมากมายในปัจจุบัน และเป็นการเตรียมช่องทางเข้าสู่การใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานราคาถูกสำหรับการใช้งานกับรถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด เครื่องยนต์สเตอร์ลิงไม่เพียงแต่จะมีประสิทธิภาพแทบจะเป็นสองเท่าตัวของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟเท่านั้น แต่เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีกระบวนการสันดาปเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง มันจึงเผาไหม้เชื้อเพลิงได้สะอาดกว่า และไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับคุณภาพของเชื้อเพลิงหรือชนิดของเชื้อเพลิง เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีการออกแบบอย่างง่าย ๆ จึงเหมาะสมที่จะผลิตขึ้นมาเป็นแหล่งต้นกำลังราคาถูกเพื่อการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล และเชื้อเพลิงอื่นๆอะไรก็ได้ ที่จะทำให้สำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา

สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะนำไปสู่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานราคาถูก เนื่องจากมันสามารถรับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยใช้ Concentrating solar collectors เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงถูกพิจารณาให้เป็นทางเลือกที่แพงน้อยที่สุดสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ในระดับ 1 kWe ถึง 100 kWe

หลักการเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรสเตอร์ลิง

งานของวัฏจักรคือ

$$W_{net} = \int p \, dv$$

$$\begin{aligned} W_{3-4} + W_{1-2} &= \int_3^4 p \, dv + \int_1^2 p \, dv \\ &= R T_3 \ln \frac{V_4}{V_3} + R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \end{aligned}$$

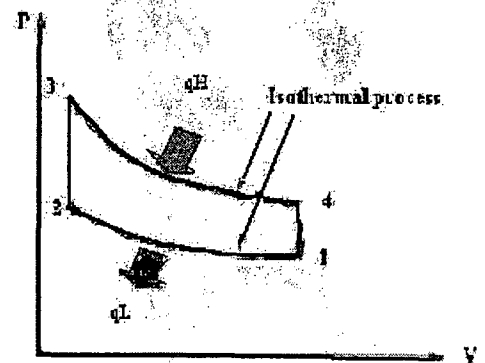
เนื่องจาก $V_2 = V_3$ และ $V_1 = V_4$ ดังนั้น

$$W_{net} = R (T_3 - T_1) \ln \frac{V_4}{V_3} = R (T_H - T_C) \ln r_V$$

เมื่อ r_V คือ อัตราส่วนการอัด V_4/V_3 หรือ V_1/V_2

ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัฏจักรคือ

$$q_H = T_3 (s_4 - s_3) = R T_3 \ln \frac{V_4}{V_3} = R T_H \ln r_V$$



รูปที่ 5 วัฏจักรสเตอร์ลิง

และประสิทธิภาพของวัฏจักรจะเป็น

$$\eta = \frac{W_{net}}{q_H} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

ซึ่งเท่ากับประสิทธิภาพคาร์โนท์

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลของวัฏจักรสเตอร์ลิงอากาศมาตรฐานจะหาได้จาก

$$W_{net} = p_m (V_4 - V_3) = \eta q_H = \left(1 - \frac{T_1}{T_3}\right) T_3 (s_4 - s_3)$$

เนื่องจากกระบวนการให้ความร้อนเกิดขึ้นโดยอุณหภูมิคงที่ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี คือ

$$s_4 - s_3 = R \ln \frac{V_4}{V_3}$$

$$\text{ดังนั้น } W_{net} = p_m (V_4 - V_3) = R (T_3 - T_1) \ln \frac{V_4}{V_3}$$

เนื่องจาก $T_2 = T_1$ และโดยการใช้กฎของก๊าซในอุดมคติ จะได้

$$W_{net} = p_m (V_4 - V_3) = (p_3 V_3 - p_2 V_2) \ln \frac{V_4}{V_3}$$

เพราะว่า $v_3 = v_2$ และจากอัตราส่วนการอัด (และการขยายตัวด้วย) $r_v =$

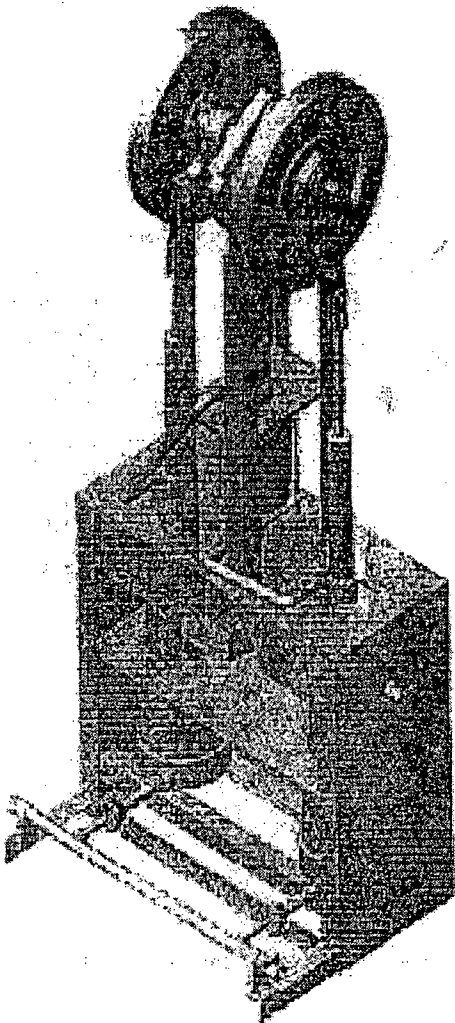
$v_4 / v_3 = v_1 / v_2$ เราจะได้

$$W_{net} = p_m (v_4 - v_3) = (p_3 - p_2) v_3 \ln r_v$$

ดังนั้นความดันเฉลี่ยประสิทธิภาพจะมีค่าเป็น

$$p_m = \frac{(p_3 - p_2)}{r_v - 1} \ln r_v$$

ถ้าการเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นในกระบวนการ 2-3 ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนใน Regenerator ระหว่างกระบวนการปริมาตรคงที่ มีค่าสูงมาก งานสุทธิจะมีค่ามากตามไปด้วย นอกจากนี้ถ้าอัตราส่วนการอัด r_v สูง และปริมาตรจำเพาะหลังถูกอัด v_3 มีค่ามาก งานสุทธิก็จะมากตามไปด้วย



รูปที่ 6 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ออกแบบ

เงื่อนไขการออกแบบ

ลักษณะของโครงร่าง	แกมมา
ลักษณะการทำงานของ Power piston	ทำงานสองด้าน
ก๊าซทำงานที่ใช้	ก๊าซหุงต้ม
การระบายความร้อน	น้ำ
อัตราส่วนปริมาตร	$r_c = 1.5$
ปริมาตร Power cylinder	600 cm ³
ปริมาตร Displacer cylinder	900 cm ³

รูปแบบของเครื่องยนต์

รูปแบบโดยรวมของเครื่องยนต์ที่ออกแบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 เป็นเครื่องยนต์แบบสูบตั้งซึ่งประกอบด้วย Power piston แบบทำงานสองด้านขนาด 600 cc จำนวน 1 สูบ และ Displacer ขนาด 900 cc จำนวน 2 สูบ อุปกรณ์ในการให้ความร้อนด้วยก๊าซหุงต้ม และอุปกรณ์ในการระบายความร้อนด้วยน้ำ

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ออกแบบสร้าง
2. อุปกรณ์ในการระบายความร้อน ซึ่งประกอบด้วย ถังน้ำขนาด 100 ลิตร และเครื่องสูบน้ำเพื่อการไหลเวียน ขนาด 90 ลิตรต่อนาที ที่ 2850 รอบต่อนาที
3. อุปกรณ์ในการให้ความร้อนด้วยก๊าซหุงต้ม ซึ่งประกอบด้วย หัวเตาหุงต้ม ดังก๊าซหุงต้มยี่ห้อ World gas ขนาด 15 kg ลีนปิดเปิดและลิ้นปรับความดัน
4. เครื่องมือวัด ประกอบด้วย ไดนาโมมิเตอร์พร้อมตาชั่งสปริงความละเอียด 10 กรัม เครื่องวัดความเร็วรอบยี่ห้อ Digicon รุ่น DT-250TP ความละเอียด 0.1 rpm เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ความละเอียด 0.001 m³ / h ตาชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Ishida รุ่น MT-150 ความละเอียด 0.01 kg นาฬิกาจับเวลายี่ห้อ Seiko ความละเอียด 0.01 วินาที เทอร์โมมิเตอร์ความละเอียด 0.5°C

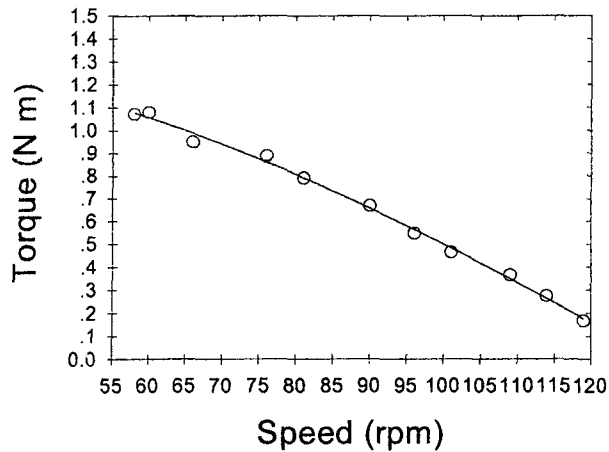
วิธีทดสอบ ทำการทดสอบโดยเป็นการให้ความร้อนคงที่ วัดสมรรถนะโดยการปรับเปลี่ยนภาระที่ไดนาโมมิเตอร์ แล้ววัดความเร็วรอบกับแรงบิด เพื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังเพลลา

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

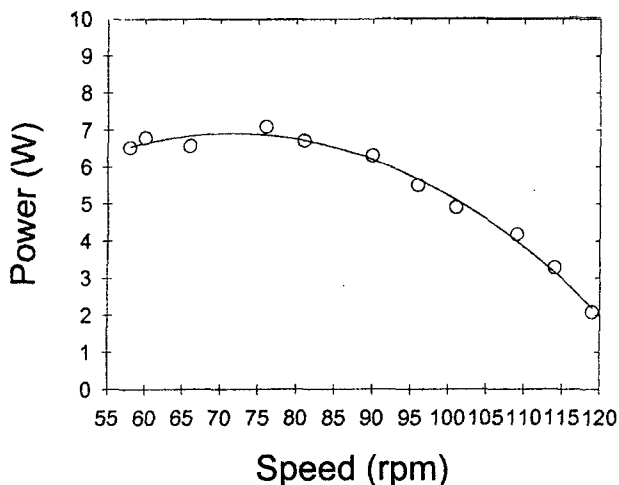
จากการทดสอบพบว่าความเร็วไรระยะของเครื่องยนต์อยู่ที่ประมาณ 120 rpm เครื่องยนต์ให้แรงบิดสูงสุดประมาณ 1.1 N.m ที่ 58 rpm ให้กำลังสูงสุดประมาณ 6.8 W ที่ 75 rpm

สรุป

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าค่าแรงบิดและกำลังที่ได้นั้นมีค่าไม่สูงมากนัก สาเหตุก็เนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนในกระบวนการถ่ายเทความร้อน เช่น การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง การสูญเสียความร้อนให้กับน้ำหล่อเย็น และแรงเสียดทานในเครื่องยนต์



รูปที่ 7 แสดงกราฟระหว่างความเร็วรอบกับทอร์ค



รูปที่ 8 แสดงกราฟระหว่างความเร็วรอบกับกำลัง

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากผลการศึกษาในขั้นต้นนั้นพบว่า ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์นั้นยังต่ำกว่าประสิทธิภาพที่ควรจะสามารถทำได้ในทางทฤษฎี ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรจะมีการปรับปรุงแก้ไขให้ระบบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับทางทฤษฎีมากยิ่งขึ้น ซึ่งถ้าสามารถปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพสูงแล้ว ก็เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบงานจริง เช่น ระบบสูบน้ำในชนบท ซึ่งอาจจะดัดแปลงใช้กับเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในท้องถิ่น เช่น แกลบ ขี้เลื่อย จนถึงแม้กระทั่งพลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Howell, J.R. and Buckius, R.O. 1992. *Fundamentals of engineering Thermodynamics*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
- [2] Hargreaves, C. M. 1991 *The Philips Stirling Engine*. Elsevier, Amsterdam.
- [3] Meijer, R.F. 1992. Stirling engine, in *McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology*, 7th ed., pp. 440-445, McGraw-Hill, New York.
- [4] Meijer, R.F. 1997. Stirling engine, in *McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology*, 8th ed., pp. 446-450, McGraw-Hill, New York.
- [5] Rizzo, J.G. 1997. *The Stirling engine manual*, Camden Miniature steam services, Somerset.
- [6] Stine, W.B. 1998. Stirling engines, in *The CRC Handbook of Mech. Eng.* CRC Press, Boca Raton.
- [7] Stine, W.B. and Diver, R.E. 1994. *A Compendium of Solar Dish Stirling Technology*, Report SAND94-7026, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185.
- [8] Walker, G. 1973. The Stirling engine, *Sci. Am.* 229(2):80-87.
- [9] Walker, G. 1980. *Stirling engines*, Clarendon Press, Oxford.
- [10] West, C.D. 1986. *Principles and Applications of Stirling Engines*, Van Nostrand Reinhold, New York