

สมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำ

Performance of Low Temperature Differential Stirling Engine.

บัญชา คังตระกูล และ ไพศาล นาผล

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

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการออกแบบและทดสอบถึงหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ที่สภาวะความแตกต่างของอุณหภูมิของส่วนที่ร้อน (Heat source) และส่วนที่เย็น (Heat sink) ต่ำ ลักษณะของเครื่องยนต์เป็นแบบแกมมา เครื่องยนต์ที่ออกแบบมีขนาด Power piston 9.7 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ Displacer 388 ลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราส่วนปริมาตร 40:1 พลังงานความร้อนที่ให้กับระบบได้จากตะเกียงแอลกอฮอล์ โดยให้ความร้อนที่ปลายด้านล่างของเครื่องยนต์ ในขณะที่ส่วนบนของเครื่องยนต์จะหล่อเย็นโดยใช้น้ำเย็น ผลจากการทดลองพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำสุดที่เครื่องยนต์สามารถเริ่มทำงานได้ประมาณ 15 องศาเซลเซียส ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุด 58 องศาเซลเซียส เครื่องยนต์มีความเร็วรอบที่ 97.8 รอบ/นาที กำลังจากการคำนวณ 0.308 วัตต์ และประสิทธิภาพความร้อนประมาณ 15.55%

Abstract

The present study focuses on the designed and performance of the stirling engine, low difference temperature. The gamma configuration of stirling engine is designed, with the volume power piston cylinder and displacer of 9.7, 388 cc, the volume ratio of 40:1. The heating from the alcohol lamp is used for heat the system at the lower end while the cool water is used as coolant at the upper end of the Stirling engine. The results shows that the minimum difference temperature for stirling engine work is 15 °C. At the maximum difference temperature is 58 °C, the revolution speed of 97.8 rpm, calculated power output of 0.308 W and 15.55% thermal efficiency.

บทนำ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำคือเครื่องยนต์สเตอร์ลิงซึ่งทำงานได้ โดยใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายด้านร้อนกับปลายด้านเย็นของ displacer น้อยที่สุด

ในขณะที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงธรรมดาจะยังได้กำลังมากขึ้นถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายด้านร้อนกับปลายด้านเย็นยิ่งแตกต่างกันมาก (ขึ้นอยู่กับการ Machining , ประสิทธิภาพของ Mechanical drive และการลดแรงเสียดทานให้น้อยที่สุดด้วย) แต่ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำจะเดินเครื่องที่ความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พัฒนาการใหม่นี้เหมาะสมกับการทำเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสำหรับการสาธิตหลักการทำงานของวัฏจักรสเตอร์ลิง ซึ่งเป็นที่สนใจเพิ่มมากขึ้นในไม่กี่ปีที่ผ่านมา

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำสามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ แบบแรกเรียกว่าเครื่องยนต์ Ringbom ซึ่งทำงานโดยใช้หลักการของ Ringbom โดยจะมีเฉพาะ power piston เท่านั้นที่ต่ออยู่กับข้อเหวี่ยงและ flywheel ตัว displacer จะเป็นอิสระอยู่ใน guide เครื่องยนต์แบบนี้พบมากกว่าเครื่องยนต์อีกแบบหนึ่งซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงธรรมดา โดยทั้ง displacer และ power piston ต่างก็ต่ออยู่กับเพลาข้อเหวี่ยงและ flywheel ทั้งคู่ โดยข้อเหวี่ยง out of phase กัน 90 องศาตามปกติ

คุณลักษณะที่สำคัญบางประการของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำคือ

- Displacer และกระบอกสูบ displacer มีขนาดใหญ่ โดย displacer ล้น และมีช่วงชักสั้น
- อัตราส่วนปริมาตรระหว่างกระบอกสูบ displacer และกระบอกสูบ power piston มีค่าสูงมาก
- ฝาสูบทั้งสองด้านของ displacer ซึ่งเป็นปลายด้านร้อนและปลายด้านเย็นนั้นเป็นวัสดุที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี

- มี dwell period ตรงปลายระยะชักของ displacer มากกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงธรรมดา
- ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ

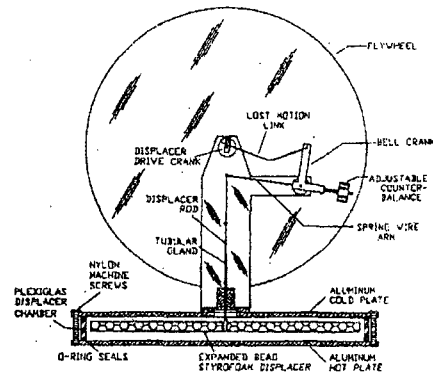
ทบทวนวรรณกรรม นักประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบนี้มีจินตนาการกว้างไกล บางคนสร้างเครื่องยนต์จาก perspex, plastic, polystyrene/styrofoam และวัสดุอื่นต่าง ๆ มาประกอบกัน บางคนเดินเครื่องยนต์แบบนี้โดยใช้ความร้อนจากฝ่ามือ บางคนใช้น้ำแข็งเพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายด้านร้อนกับปลายด้านเย็น

จุดเริ่มต้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความแตกต่างของอุณหภูมิสามารถสืบย้อนไปจนถึง Prof. Ivor Kolin แห่ง Zagreb ผู้ซึ่งมีประสบการณ์หลายปีในการสร้างเครื่องยนต์จำนวนมาก จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1983 เขาได้เสนอเครื่องยนต์ซึ่งทำงานโดยใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายด้านร้อนกับปลายด้านเย็นของ displacer ต่ำเพียง 15°C การสร้างเครื่องยนต์นี้ต้องพึ่งการทดลองอย่างมาก เกี่ยวข้องทั้งในแง่รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงดั้งเดิมและหลักการของ Ringbom

Prof. James R. Senft แห่งมหาวิทยาลัย Wisconsin สหรัฐอเมริกา ได้ศึกษาในรายละเอียดอย่างลึกซึ้งของเครื่องยนต์ Ringbom และ derivatives ของเครื่องยนต์ Ringbom รวมทั้งเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำ Prof. Senft ได้ทำการทดลองกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำ เป็นผลให้ได้เครื่องยนต์ P-19 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่น่าสนใจมาก เพราะสามารถทำงานได้ด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำมาก คือ 0.5°C เท่านั้น แหล่งให้ความร้อนคือฝ่ามือคน หลังจากวางเครื่องยนต์บนฝ่ามือให้มีการถ่ายเทความร้อนประมาณ 15 วินาที ก็จะสามารถเดินเครื่องยนต์ได้และเพียงไม่กี่นาทีก็จะมีความเร็วสูงถึง 60 รอบ/นาที อีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิก็คือโดยการวางแก้วใส่น้ำแข็งไว้ด้านเย็นของ displacer ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของด้านเย็นของ displacer ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศรอบข้าง

การพัฒนาให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดยิ่งไปกว่านั้นดูเป็นสิ่งที่ยากมาก รายงานของ Prof. Senft (ISEC Paper เสนอที่ Dubrovnik 1991) ได้ก่อให้เกิดการกระตุ้นอย่างมากเกี่ยวกับหลักการของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและเครื่องยนต์ความร้อนทั่วไป ในรายงานมีจุดมุ่งหมายอยู่ที่การสร้างเครื่องยนต์ที่สามารถทำงานโดยใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิ 2°C หรือต่ำกว่า เครื่องยนต์นี้กระบอกสูบของ displacer สร้างจาก perspex และลูกสูบ power piston ทำจาก graphite เพื่อลดแรงเสียดทานให้เหลือน้อยที่สุด และมีการใช้ balance linkage สำหรับทั้ง displacer และ power piston

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำแบบอื่นคือ Solar Stirling motor ของ Prof. Ivor Kolin ซึ่งมี 2 ขนาดคือ 200 mm x 200 mm x 40 mm หรือ 140 mm x 140 mm x 30 mm โดยกระบอกสูบ displacer โปร่งใส ทำจาก Madrolon ให้ความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ หรือตะเกียงเล็กๆ ทำงานโดยมีความแตกต่างของอุณหภูมิ 20°C



รูปที่ 1 เครื่องยนต์ P-19 ของ Prof. Senft's

เทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรสเตอร์ลิง

งานของวัฏจักรคือ

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

$$W_{3-4} + W_{1-2} = \int_3^4 p \, dv + \int_1^2 p \, dv$$

$$= R T_3 \ln \frac{V_4}{V_3} + R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

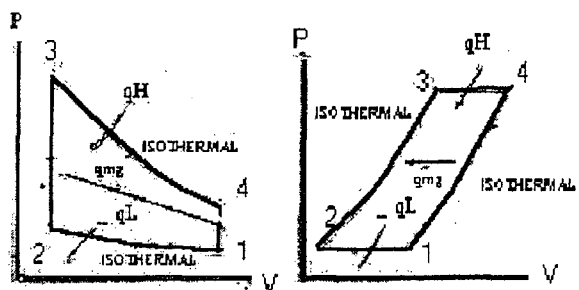
เนื่องจาก $v_2 = v_3$ และ $v_1 = v_4$ ดังนั้น

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

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 2 วัฏจักรสเตอร์ลิง

และประสิทธิภาพของวัฏจักรจะเป็น

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

ซึ่งเท่ากับประสิทธิภาพคาร์โนทนั่นเอง

ความดันเฉลี่ยประสิทธิภาพของวัฏจักรสเตอร์ลิงจากมาตรฐานจะหาได้จาก

$$W_{net} = p_m (v_4 - v_3) = \eta_{QH} = \left(1 - \frac{T_1}{T_3}\right) T_3 (s_4 - s_3)$$

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

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

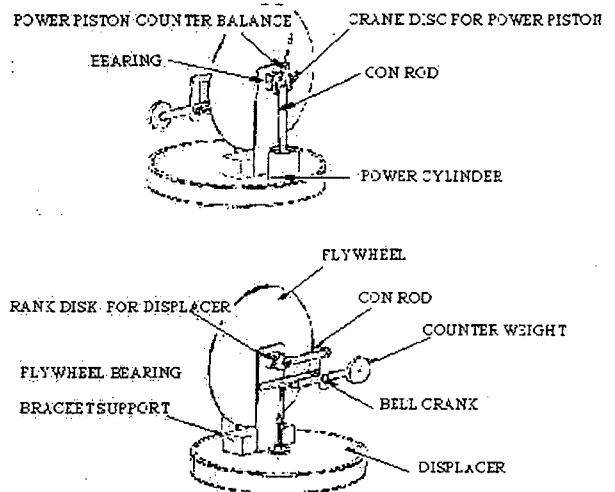
ถ้าการเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นในกระบวนการ 2-3 ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนใน regenerator ระหว่างกระบวนการปริมาตรคงที่มีค่าสูงมาก งานสุทธิจะมีค่ามากตามไปด้วย นอกจากนี้ถ้าอัตราส่วนการอัด r_v สูง และปริมาตรจำเพาะหลังถูกอัด v_3 มีค่ามากงานสุทธิก็จะมากตามไปด้วย

เงื่อนไขการออกแบบ

ลักษณะของโครงร่าง	แกมมา
ลักษณะการทำงานของ Power piston	ทำงานด้านเดียว
ก๊าซทำงานที่ใช้	อากาศ
การระบายความร้อน	อากาศ
อัตราส่วนปริมาตร	$r_c = 40:1$
ปริมาตร Power cylinder	9.7 cm^3
ปริมาตร Displacer cylinder	388 cm^3

รูปแบบของเครื่องยนต์

รูปแบบโดยรวมของเครื่องยนต์ที่ออกแบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 เป็นเครื่องยนต์แบบสูบตั้งซึ่งประกอบด้วย power piston แบบทำงานด้านเดียวขนาด 9.7 cc จำนวน 1 สูบ และ displacer ขนาด 388 cc จำนวน 1 สูบ อุปกรณ์ในการให้ความร้อนใช้ตะเกียงอัลกอลกอฮอล์ และในการระบายความร้อนใช้อากาศ หรือน้ำแข็งใส่ในแกว่งบนฝาสูบด้านเย็นของ displacer



รูปที่ 3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ออกแบบสร้าง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ออกแบบสร้าง
2. อุปกรณ์ในการระบายความร้อนใช้น้ำแข็งในถังน้ำแข็งขนาด 150 cc
3. อุปกรณ์ในการให้ความร้อนใช้ตะเกียงอัลกอลกอฮอล์
4. เครื่องมือวัด ประกอบด้วย เครื่องวัดความเร็วรอบยี่ห้อ Digicon รุ่น DT-250TP ความละเอียด 0.1 rpm ตัวชั่งดิจิทัลยี่ห้อ Ishida รุ่น MT-150 ความละเอียด 0.01 kg นาฬิกาจับเวลายี่ห้อ Seiko ความละเอียด 0.01 วินาที Thermocouple รุ่น AI -305 ความละเอียด 0.1°C

วิธีทดสอบ ทำการทดสอบโดยเป็นการให้ความร้อนคงที่ วัดอุณหภูมิ ด้านร้อนและด้านเย็นเมื่อเครื่องยนต์ติดแล้ววัดความเร็วรอบ

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการทดสอบพบว่าเครื่องยนต์สามารถติดได้ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิประมาณ 15°C ต่อมาความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะสูงขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่ง ซึ่งจะได้ความเร็วไว้การของเครื่องยนต์อยู่ที่ประมาณ 97.8 รอบต่อนาที โดยด้านร้อนมีอุณหภูมิ 100°C มีความแตกต่างของอุณหภูมิประมาณ 58°C ค่าแรงได้กำลังประมาณ 0.308 W ที่ 76 rpm ประสิทธิภาพประมาณ 15.55%

สรุป

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากำลังและประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้นั้นมีค่าไม่สูงมากนัก สาเหตุก็เนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนในกระบวนการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น การสูญเสียความร้อนภายในระบบเกิดเนื่องจากความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของอัลกอลกอฮอล์มีการสูญเสียให้กับการหล่อเย็นโดย regenerative matrix เก็บสะสมความร้อนไม่ได้ทั้งหมดและการสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากผลการศึกษาในขั้นต้นนั้นพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์นั้นยังต่ำเนื่องจากการสูญเสียความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์ และการรั่วของอากาศร้อนที่ displacer rod และ power piston rod เพราะเป็นการกันรั่วด้วยน้ำมัน ทำให้อากาศรั่วง่าย การรั่วที่ฝาสูบของ displacer ก็สำคัญเช่นกัน สิ่งที่ต้องปรับปรุงอีกก็คือฝาสูบของ displacer ควรเป็นวัสดุที่ถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่านี้ กระบอกสูบของ displacer ควรเป็นฉนวนและทนความร้อนได้ดีกว่านี้ และปริมาณ regenerative matrix จะต้องมากพอที่จะเก็บความร้อนภายในไว้ ให้ด้านเย็นมีอุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศมากนัก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายเฉลิมศักดิ์ ชื้อสตัย นายธนภูมิ จันทเขต และ นายวัชร ไยผุย นิสิตภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ที่เข้าร่วมทำโครงการวิศวกรรมศาสตร์ จนกระทั่งงานวิจัยชิ้นนี้เป็นผลสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Howell, J.R. and Buckius, R.O. 1992. *Fundamentals of engineering Thermodynamics*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
- [2] Meijer, R.F. 1997. Stirling engine, in *McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology*, 8th ed., pp. 446-450, McGraw-Hill, New York.
- [3] Rizzo, J.G. 1997. *The Stirling engine manual*, Camden Miniature steam services, Somerset.
- [4] Stine, W.B. 1998. Stirling engines, in, *The CRC Handbook of Mech. Eng.* CRC Press, Boca Raton.
- [5] Senft, J. R. 1993 *Ringbom Stirling Engines*, Oxford University Press, New York.
- [6] Stine, W.B. and Diver, R.E. 1994. *A Compendium of Solar Dish Stirling Technology*, Report SAND94-7026, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185.
- [7] Walker, G. 1980. *Stirling engines*, Clarendon Press, Oxford.
- [8] West, C.D. 1986. *Principles and Applications of Stirling Engines*, Van Nostrand Reinhold, New York