

# การศึกษามรรถนะเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

## A Performance Study of A Stirling Engine

เผชิญ จันทรสา<sup>1\*</sup> อุดลย์ พัฒนภักดี<sup>1</sup> และ วิทยา พันธุ์เจริญศิลป์<sup>1</sup>  
Pachern Jansa<sup>1\*</sup>, Adual Pattanapukdee<sup>1</sup>, Vitthaya Phunjareonsilp<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการทดลองหาสมรรถนะเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยได้ประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบและระยะชักของลูกสูบทั้ง 2 ชุดเท่ากันที่ 20 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความยาวก้านสูบของลูกสูบฝั่งรับความร้อนเท่ากับ 79 มิลลิเมตร ความยาวก้านสูบของลูกสูบฝั่งระบายความร้อนเท่ากับ 58 มิลลิเมตร ใช้ความร้อนจากเปลวไฟของหัวเผาเครื่องเชื่อมแก๊สเป็นแหล่งให้ความร้อน การทดลองพบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเริ่มหมุนได้เมื่ออุณหภูมิกระบอกสูบฝั่งรับความร้อนเท่ากับ 248 องศาเซลเซียส ความแตกต่างอุณหภูมิผิวกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่ง มีค่า 109 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยงเท่ากับ 352 รอบต่อนาที และที่สภาวะคงตัวอุณหภูมิผิวกระบอกสูบฝั่งรับความร้อนเท่ากับ 305 องศาเซลเซียส ความแตกต่างอุณหภูมิผิวกระบอกสูบเท่ากับ 137.5 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยงเท่ากับ 789 รอบต่อนาที วิเคราะห์กำลังบ่งชี้สูงสุดได้เท่ากับ 85 วัตต์ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนคาร์โนท์เฉลี่ยเท่ากับ 44.5 เปอร์เซ็นต์

### ABSTRACT

This paper presents an experimental study to evaluate the performance of the artificial stirling engine. The alpha type of a small stirling engine has been fabricated with bore and stroke of both of hot cylinder and cold cylinder are 20 mm and 30 mm respectively. For the connecting rod length, there are 79 mm for the hot cylinder and 58 mm for the cold cylinder. A frame of the burner of a gas welding machine is used as the heat source for the artificial stirling engine. The results show that the artificial stirling engine can start continually cranking with the speed of 352 rpm at the outside temperature surface of hot cylinder is 248 °C and the surface temperature difference between hot and cold cylinder is about 109 °C. The artificial stirling engine can operate to the maximum speed about 789 rpm with the outside temperature surface of hot cylinder is 305 °C and the surface temperature difference between hot and cold cylinder is 137.5 °C. The calculation can be found that the indicated power of the artificial stirling engine is 85 W and the average thermal efficiency is 44.5 %

Key Words: stirling engine, power of engine, thermal efficiency

\*Corresponding author; e-mail address: pachern.ja@spu.ac.th

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมระบบเครื่องกลและนวัตกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ 10900

<sup>1</sup>Department of Mechanical System and Innovative Industrial Engineering, School of Engineering, Sripatum University, Bangkok 10900

## บทนำ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling engine) เป็นเครื่องยนต์ระบบปิด 2 จังหวะ ที่ประกอบด้วยชุดลูกสูบและกระบอกสูบ 2 ชุด เชื่อมช่องทางเดินก๊าซถึงกันได้แก่ชุดลูกสูบ-กระบอกสูบริบความร้อนและชุดลูกสูบ-กระบอกสูบริบายความร้อน ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Robert Stirling (ค.ศ. 1790-1878) เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอก ทำให้การประยุกต์ใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในและสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายประเภท เช่น ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม แหล่งความร้อนใต้พิภพ หรือความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่ให้งานออกมาโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิของก๊าซในระบบที่ทำหน้าที่เป็นของไหลทำงาน ความร้อนที่ป้อนให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะทำให้ก๊าซในระบบมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น เกิดการขยายตัวของกระบอกสูบดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ได้ออกมาที่เพลลาข้อเหวี่ยง

การศึกษานี้มีแนวคิดในการออกแบบและประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กขึ้นมา เนื่องจากเป็นรูปแบบที่มีอัตราส่วนของกำลังงานต่อปริมาตรสูง โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่าย สำหรับใช้ศึกษาเชิงทดลองหาสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานความร้อนภายนอกที่เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกอื่น ๆ ที่หลากหลายต่อไป

## การออกแบบและคำนวณ

### การประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็ก

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กที่จะออกแบบเพื่อประดิษฐ์ขึ้นสำหรับการศึกษาและทดลองหาสมรรถนะ นั้น เป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในรูปแบบแอลฟา ซึ่งจะมีตำแหน่งการทำงานของลูกสูบฝั่งเย็น (ฝั่งระบายความร้อน) กับลูกสูบฝั่งร้อน (ฝั่งรับความร้อน) ต่างกัน 90 องศา (Figure 1) ชุดกระบอกสูบฝั่งร้อนและชุดกระบอกสูบฝั่งเย็นจะติดตั้งทำมุมตั้งฉากกัน โดยก้านสูบของชุดลูกสูบทั้ง 2 ฝั่งจะมีจุดต่อเชื่อมกับเพลลาข้อเหวี่ยงที่จุดเดียวกัน

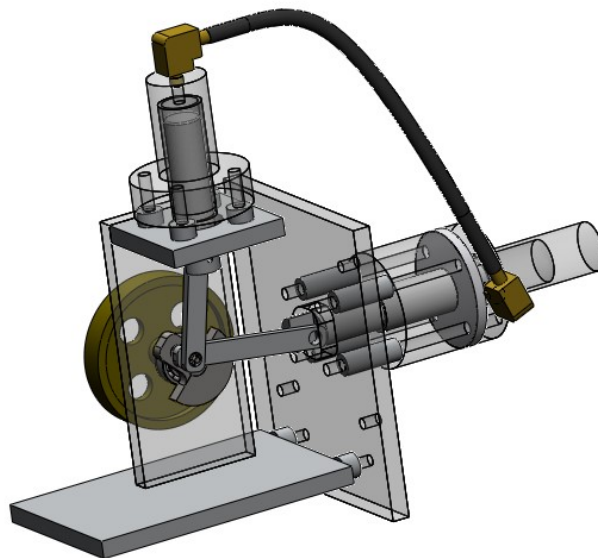


Figure 1 Graphic design of an artificial alpha type of a small stirling engine.

ปริมาตรกระบอกสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้น จะเป็นปริมาตรของกระบอกสูบ 2 กระบอกสูบรวมกัน ดังนั้นการพิจารณาหาปริมาตรมากที่สุดและปริมาตรน้อยสุดจึงต้องพิจารณาดำแหน่งของลูกสูบทั้งสองฝั่งไปพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถหาปริมาตรกระบอกสูบมากที่สุดและน้อยสุดได้จากสภาวะการทำงานที่สัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของก๊าซในกระบอกสูบ ซึ่งการหาปริมาตรมากสุดในกระบอกสูบพิจารณาขณะลูกสูบฝั่งเย็นอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (Figure 2) และปริมาตรน้อยสุดในกระบอกสูบได้พิจารณาขณะลูกสูบฝั่งเย็นอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน (Figure 3)

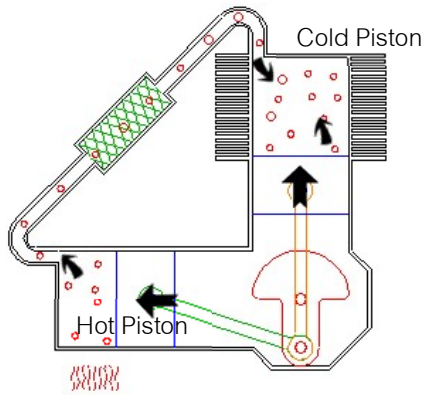


Figure 2 The state with maximum volume

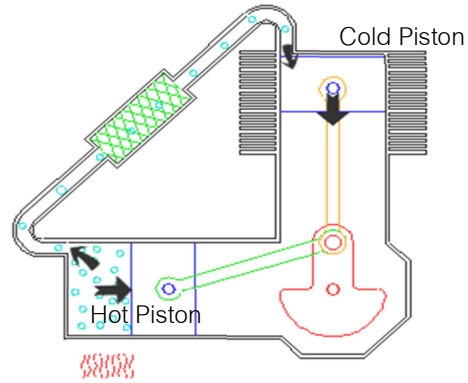


Figure 3 The state with minimum volume

Source: <http://www.animatedengines.com/>

ปริมาตรรวมในกระบอกสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถหาได้จาก  $V = V_H + V_L$  โดยที่  $V_H$  คือ ปริมาตรของกระบอกสูบฝั่งร้อน และ  $V_L$  คือ ปริมาตรของกระบอกสูบฝั่งเย็น ปริมาตรมากสุดในกระบอกสูบจะเป็นตำแหน่งที่ลูกสูบฝั่งร้อนมีระยะชักเท่ากับ  $L/2$  และลูกสูบฝั่งเย็นมีระยะชักเท่ากับ  $L$  (Figure 2) ซึ่งจะได้  $V_{max} = V_H + V_L = \frac{\pi d^2 (L/2)}{4} + \frac{\pi d^2 (L)}{4}$  โดยที่  $d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ และ  $L$  คือ ขนาดระยะชักของลูกสูบ ส่วนปริมาตรน้อยสุดในกระบอกสูบจะเป็นตำแหน่งที่ลูกสูบฝั่งร้อนมีระยะชักเท่ากับ  $L/2$  แต่ลูกสูบฝั่งเย็นมีระยะชักเป็นศูนย์ (Figure 3) ซึ่งจะได้  $V_{min} = V_H = \frac{\pi d^2 (L/2)}{4}$  โดยจะได้อัตราส่วนการอัดเท่ากับ  $r_c = \frac{V_{max}}{V_{min}}$

หลังจากการออกแบบเชิงกราฟิกด้วยคอมพิวเตอร์แล้ว ก็ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็ก (Figure 4) เพื่อใช้สำหรับการศึกษาและทดลองหาสมรรถนะ โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นมีชิ้นส่วนต่างๆผลิตขึ้นจากอะลูมิเนียม ยกเว้นชุดปลอกกระบอกสูบและลูกสูบที่ใช้ชุดหล่อดแก้วของกระบอกชนิดยาซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบทั้ง 2 ชุดเป็น 20 mm และมีขนาดรัศมีของเพลาลูกสูบเท่ากับ 15 mm ส่วนความยาวก้านสูบของชุดลูกสูบฝั่งร้อนมีค่าเท่ากับ 79 mm และความยาวก้านสูบของชุดลูกสูบฝั่งเย็นมีค่าเท่ากับ 58 mm

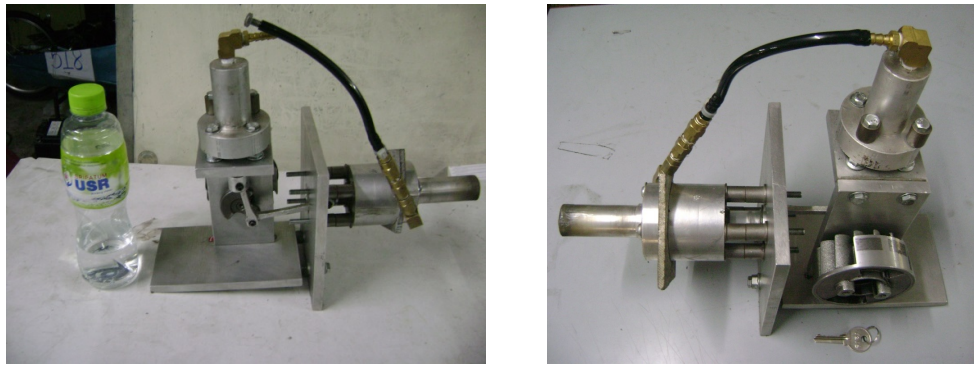


Figure 4 The artificial alpha type of a small stirling engine

### การคำนวณหาพลังงานและประสิทธิภาพของเครื่องสเตอร์ลิง

ความดันในกระบอกสูบสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้กฎของก๊าซอุดมคติ  $PV = mRT$  โดยที่  $R$  คือค่าคงที่ของก๊าซ  $m$  คือมวลของก๊าซ  $P$  คือความหนาแน่นของอากาศ และ  $T$  คืออุณหภูมิของก๊าซในกระบอกสูบ

การทำงานของวัฏจักรสเตอร์ลิงประกอบด้วย 4 กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งประกอบไปด้วย กระบวนการอุณหภูมิคงที่ 2 กระบวนการและกระบวนการปริมาตรคงที่ 2 กระบวนการ ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตร (P-V diagram) และอุณหภูมิกับเอนโทรปี (T-S diagram) ของก๊าซในกระบอกสูบ (Figure 5)

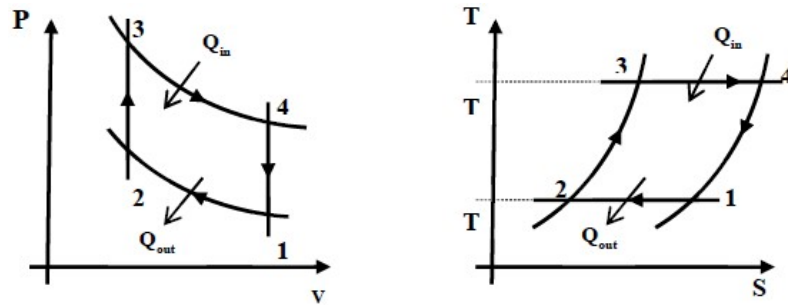


Figure 5 P-V and T-S diagram of a stirling cycle

การพิจารณาหาอุณหภูมิและความดันของก๊าซในกระบอกสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในแต่ละสถานะ นั้น สามารถวิเคราะห์ตามกระบวนการดังนี้

กระบวนการที่ 1→2 เป็นการอัดตัวแบบกระบวนการอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Compression Process) ซึ่งจากสมการก๊าซอุดมคติ (สมการที่ 3) โดยที่  $T_2 = T_1$  จะได้ว่า  $P_1V_1 = P_2V_2$  หรือ  $P_2 = P_1 \times r_c$

กระบวนการที่ 2→3 เป็นการให้ความร้อนแบบกระบวนการปริมาตรคงที่ (Heat Addition at Constant Volume Process) จากสมการก๊าซอุดมคติ โดยที่  $V_3 = V_2$  จะได้ว่า  $\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$  หรือ  $P_3 = T_3 \times \frac{P_2}{T_2}$

กระบวนการ 3→4 เป็นการขยายตัวแบบกระบวนการอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Expansion Process) จากสมการก๊าซอุดมคติ โดยที่  $T_4 = T_3$  จะได้ว่า  $P_3V_3 = P_4V_4$  หรือ  $P_4 = P_3 \times \frac{1}{r_c}$

และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรสเตอร์ลิง  $\eta_{th} = 1 - \frac{T_c}{T_H}$

กำลังงานบ่งชี้ที่ได้จากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงงานในระบบสูบอันเนื่องมาจากการขยายตัวและหดตัวของก๊าซซึ่งเป็นสารทำงานที่มีการได้รับและสูญเสียความร้อนในระหว่างวัฏจักร กำลังงานที่เกิดขึ้นในขณะใดขณะหนึ่งสามารถหาได้จากความดันภายในระบบสูบที่เปลี่ยนเป็นแรงกระทำกับลูกสูบให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วขณะนั้นตามสมการ  $\dot{P}_{stir} = F \times \bar{S}_p$  โดยที่  $F$  คือแรงกระทำกับลูกสูบ ( $F = P \times A_c$  เมื่อ  $A_c$  คือพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ)  $\bar{S}_p$  คือความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบ ( $\bar{S}_p = 2LN$  เมื่อ  $N$  คือความเร็วรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยง)

กำลังงานบ่งชี้สูงสุดที่ได้จะเกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบมีค่าสูงสุด ณ ขณะลูกสูบเคลื่อนถึงตำแหน่งกึ่งกลางของระยะชัก (ตำแหน่งของมุมเพลาช้อเหวี่ยงมีค่าเท่ากับ 90 องศา) ซึ่งความดันของระบบสูบที่นำมาคิดแรงกระทำกับลูกสูบจะเป็น  $P_{3.5} = P_3 \times \frac{2}{r_c}$

### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

#### วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้น จะทำการทดลองให้ความร้อนกับชุดกระบอกสูบฝั่งรับความร้อนโดยใช้เปลวไฟจากเครื่องเชื่อมแก๊ส จากนั้นจะทำการวัดอุณหภูมิผิวด้านนอกของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่งไปเรื่อยๆพร้อมๆกับการใช้มือคอยหมุนเพลาช้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เมื่อเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเริ่มหมุนได้เองต่อเนื่องจากการใช้มือช่วยหมุน ก็จะเริ่มจดบันทึกข้อมูลอุณหภูมิผิวด้านนอกของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่ง และค่าความเร็วรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยงที่วัดได้จากเครื่องวัดความเร็วรอบทุกๆ 0.5 นาที



Figure 6 Experimental test of the artificial alpha type of small stirling engine

#### ผลการทดลอง

จากการทดลองการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้น สามารถแสดงผลการวัดอุณหภูมิผิวกระบอกสูบและความเร็วรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยงที่ได้ดังต่อไปนี้ (Table 1)

Table 1 Experimental results of the artificial alpha type of small stirling engine.

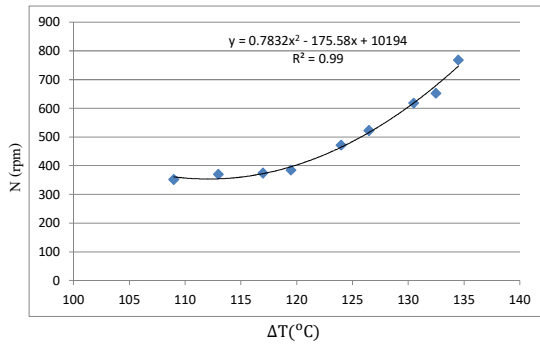
Time (min)	$T_H$ (°C)	$T_L$ (°C)	$N$ (rpm)
0	240	136.0	0
0.5	248	139.0	352
1.0	256	143.0	370
1.5	264	147.0	374
2.0	269	149.5	384
2.5	278	154.0	471
3.0	283	156.5	522
3.5	291	160.5	618
4.0	295	162.5	652
4.5	299	164.5	768
5.0	305	167.5	789

จากผลทดลอง (Table 1) พบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กแบบแอลฟาที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถเริ่มทำงานเองได้เมื่ออุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งร้อนมีค่าเท่ากับ 248 °C และอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งเย็นมีค่าเท่ากับ 139 °C ซึ่งสามารถวัดความเร็วรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยงได้เท่ากับ 352 rpm จากนั้นเมื่อให้ความร้อนไปเรื่อยๆจะส่งผลให้อุณหภูมิผิวของกระบอกสูบแต่ละฝั่งมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยผลต่างอุณหภูมิผิวของ 2 กระบอกสูบเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งความเร็วรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยงก็มีค่าเพิ่มขึ้นตาม จากนั้นการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะเข้าสู่สภาวะคงตัวในสภาพแวดล้อมขณะทำการทดลอง โดยมีค่าอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งร้อนสูงสุดเท่ากับ 305 °C มีอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งเย็นสูงสุดเท่ากับ 167.5 °C และมีค่าความเร็วรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยงสูงสุดเท่ากับ 789 rpm และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาคำนวณหาอุณหภูมิและความดันของก๊าซในกระบอกสูบในแต่ละสถานะเพื่อวิเคราะห์หากำลังงานและประสิทธิภาพตลอดช่วงเวลาของการทดสอบ (Table 2) เมื่อนำค่าความเร็วรอบการหมุนเพลาช้อเหวี่ยงและแรงกระทำกับลูกสูบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับค่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างสองกระบอกสูบ (Figure 7, Figure 8) จะเห็นว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิกระบอกสูบเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยงในช่วงแรกหลังจากเริ่มหมุน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งความแตกต่างของอุณหภูมิมียุคถึงประมาณ 120 °C จึงจะเริ่มทำให้ความเร็วรอบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็นแนวโน้มของฟังก์ชันของกราฟเส้นโค้ง ในส่วนของแรงกระทำกับลูกสูบนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างของอุณหภูมิกระบอกสูบเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กันเป็นฟังก์ชันของกราฟเส้นตรง และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานเทียบกับค่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างสองกระบอกสูบ (Figure 9) พบว่ามีความสัมพันธ์กันเป็นฟังก์ชันของกราฟเส้นโค้งเช่นเดียวกับกราฟของความเร็วรอบการหมุนเพลาช้อเหวี่ยง

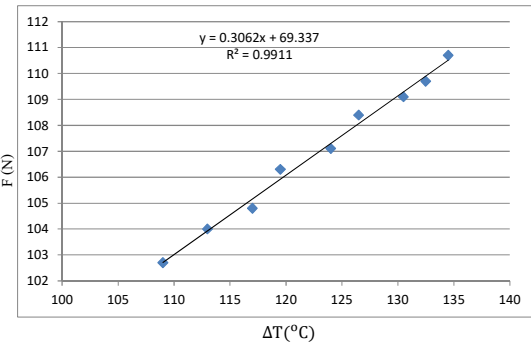
จากนั้นเมื่อนำกำลังงานและประสิทธิภาพมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับความเร็วรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยง จะเห็นว่ากำลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะความสัมพันธ์แบบกราฟเส้นตรงตามค่าความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น ส่วนประสิทธิภาพเชิงความร้อนนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่แม้ความเร็วรอบจะมีค่าเพิ่มขึ้น (Figure 10)

**Table 2** Calculation results of the artificial alpha type of small stirling engine.

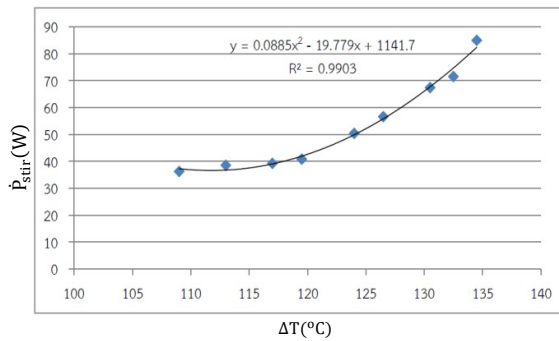
Time (min)	$\Delta T$ (°C)	$N$ (rps)	$P_{3.5}$ (kPa)	$F$ (N)	$\bar{S}_p$ (m/s)	$\dot{P}_{str}$ (W)	$\eta_{th}$ (%)
0	104	0.0	322.9	101.4	0.00	0.0	43.3
0.5	109.0	5.9	327.1	102.7	0.35	36.2	44.0
1.0	113.0	6.2	331.3	104.0	0.37	38.5	44.1
1.5	117.0	6.2	333.8	104.8	0.37	39.2	44.3
2.0	119.5	6.4	338.5	106.3	0.38	40.8	44.4
2.5	124.0	7.9	341.1	107.1	0.47	50.4	44.6
3.0	126.5	8.7	345.3	108.4	0.52	56.6	44.7
3.5	130.5	10.3	347.3	109.1	0.62	67.4	44.8
4.0	132.5	10.9	349.4	109.7	0.65	71.5	44.9
4.5	134.5	12.8	352.5	110.7	0.77	85.0	45.0
5.0	137.5	13.2	-	-	-	-	45.1



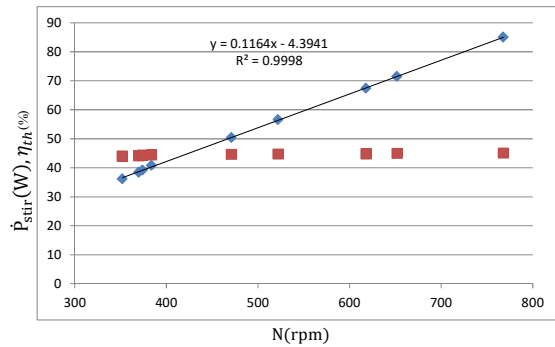
**Figure 7** Crank speed compared to cylinder surface temperature difference



**Figure 8** Force exert on piston compared to cylinder surface temperature difference



**Figure 9** Power compared to cylinder surface temperature difference



**Figure 10** Power and thermal efficiency compared to crank speed

## สรุป

จากการประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กขึ้นมา พบว่าสามารถนำมาใช้ทดสอบการทำงานได้โดยใช้แหล่งความร้อนภายนอกจากเปลวไฟของเครื่องเชื่อมแก๊ส ผลการทดสอบการทำงานพบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเองอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วรอบการหมุนเพลลาข้อเหวี่ยงเท่ากับ 352 rpm เมื่ออุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งร้อนมีค่าเท่ากับ 248 °C ด้วยผลต่างของอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่งเท่ากับ 109 °C และมีการทำงานเข้าสู่ภาวะคงตัวในสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งร้อนมีค่าเท่ากับ 305 °C ด้วยผลต่างของอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่งเท่ากับ 137.5 °C โดยมีค่าความเร็วรอบการหมุนเพลลาข้อเหวี่ยงสูงสุดเท่ากับ 789 rpm จากผลการคำนวณและวิเคราะห์สมรรถนะพบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นมีความเร็วรอบการหมุนของเพลลาข้อเหวี่ยงเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันของกราฟเส้นโค้งเช่นเดียวกับกราฟของกำลังงานเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของผลต่างอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่ง ในขณะที่แรงจากความดันก๊าซภายในกระบอกสูบที่กระทำกับลูกสูบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงเมื่อเทียบกับผลต่างอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นมีผลการวิเคราะห์กำลังงานบ่งชี้สูงสุด 85 W ที่ความเร็วรอบ 768 rpm และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนคาร์โนท์เฉลี่ยเท่ากับ 44.5 %

อย่างไรก็ตามแรงกระทำกับลูกสูบที่นำไปวิเคราะห์กำลังงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กนั้น เป็นผลการคำนวณที่ได้จากค่าความดันซึ่งประเมินจากวัฏจักรการทำงานทางทฤษฎีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (แม้จะอ้างอิงจากอุณหภูมิที่ได้จากการวัดในการทดสอบจริงก็ตาม) ดังนั้นในหากจะมีการศึกษาต่อไป อาจมีการติดตั้งเครื่องวัดความดันที่สามารถบอกค่าความดันของก๊าซในกระบอกสูบได้ชัดเจนเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มาจากข้อมูลของการทดสอบจริงทั้งหมด

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะนักศึกษาศาสาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีปทุม ได้แก่ นายดิฐพุม ชินบุตร นายสิทธิชัย นาควิไล และนายจิรายุทธ อองอาจ ที่ช่วยเหลือในประดิษฐ์ชิ้นงาน การทดสอบและเก็บข้อมูลสำหรับการศึกษานี้ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่มีส่วนสนับสนุนการนำเสนอบทความในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

บัณฑิต ลิ้มมีโชคชัย, เษิญ จันทรสา และจ่านง สรพิพัฒน์. 2549. ศักยภาพเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตไฟฟ้าพลัง

แสงอาทิตย์ในประเทศไทย. ใน รายงานการประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

ไทย ครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

สมพจน์ คำแก้ว และ บัญชา คังตระกูล. 2558. การทบทวนต้นแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาจากเครื่องอัด

อากาศ. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ 8 (1): 58 - 65

Stirling engine. Available Source: [https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine), November15, 2019

Two Cylinder Stirling Engine. Available Source: <http://www.animatedengines.com/>, November15,

2019