

**การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของกลไกขับเคลื่อนแบบรอมบิกสำหรับ
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกระบอกสูบเดี่ยวแบบเบต้า**
**Optimum Design of Rhombic Drive Mechanism for
a Single Cylinder Beta Stirling Engine**

พงศ์สินธุ์ ธนวัฒน์เสรี^{1*} ดุลยโชติ ชลศึกษ์²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120

โทร 0-2564-3001 โทรสาร 0-2564-3010 *อีเมล phongsin@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงลูกสูบเดี่ยวแบบเบต้า ซึ่งใช้สารทำงานเป็นฮีเลียม ที่ทำงานที่ความดัน 5.2 เมกะปาสคาล อุณหภูมิตัวนำร้อน 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิตัวนำเย็น 30 องศาเซลเซียส เป้าหมายคือต้องการกำลังบ่งชี้สูงสุดออกจากเครื่องยนต์ โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสัดส่วนในกลไกขับเคลื่อนแบบรอมบิกบนพื้นฐานสัดส่วนเริ่มต้นที่ได้มาจากข้อมูลของเครื่องยนต์ GPU-3 ของบริษัทเจเนอรัล มอเตอร์ โดยการคำนวณกำลังบ่งชี้ใช้วิธีการเชิงตัวเลขที่พัฒนามาจากแบบจำลองของ Urieli

ผลการออกแบบที่ได้คือสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดของกลไกขับเคลื่อนซึ่งคาดว่าจะทำให้ได้กำลังบ่งชี้สูงสุดเพิ่มขึ้นจากเดิม 30 เปอร์เซ็นต์

คำหลัก: การออกแบบที่เหมาะสมที่สุด, เครื่องยนต์สเตอร์ลิง, กลไกรอมบิก

Abstract

This article presents design optimization of a single cylinder Beta-type Stirling engine, which use Helium as the working fluid at mean pressure 5.12 MPa, heater gas temperature of 500 C and cooling water temperature of 30 C. The objective is to maximize power output from the engine by vary geometry of rhombic drive mechanism based on initial geometry from an existing General Motor's GPU-3 engine. The power output is computed by a mathematical model based on the Urieli's model. The optimization result suggests the new geometry that predicts 30% increase of output power.

Keywords: Optimum Design, Stirling Engine, Rhombic drive

1. บทนำ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกระบอกสูบเดี่ยวแบบเบต้า เป็นเครื่องยนต์ที่มีความน่าสนใจในแง่ความ

เป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้กับแหล่งความร้อนได้หลากหลาย หากมีการออกแบบที่เหมาะสมจะทำให้ได้ประสิทธิภาพและกำลังขาออกที่สูง ซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้าของคณะ ผู้เขียน [1] ได้ทำการปรับปรุง

โปรแกรมการคำนวณกำลังปั๊มของเครื่องยนต์ Urieli [2] และสอบทวนกับผลที่ได้จากทดสอบจริงจากเครื่องยนต์ GPU-3 [3] โดยพบว่าสามารถทำนายกำลังปั๊มของเครื่องยนต์ดังกล่าวได้ด้วยคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 % งานวิจัยนี้จึงนำโปรแกรมดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงการออกแบบเครื่องยนต์ GPU-3 ให้ได้กำลังปั๊มที่สูงที่สุดด้วยการปรับสัดส่วนกลไกระบบขับเคลื่อนแบบรอมบิก โดยพิจารณาให้ตัวแปรอื่นๆ คือ อุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น ความดัน สารทำงาน ความเร็วรอบ มีค่าคงที่

2. โปรแกรมการคำนวณกำลังปั๊ม

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1] คณะผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงโปรแกรมกำลังปั๊มของเครื่องยนต์สเตลิง จากโปรแกรมของ Ureili [2] โดยนำผลการทดสอบเครื่องยนต์ GPU-3 โดยสถาบันวิจัยลูอิส [3] มาใช้ประกอบการปรับปรุงดังนี้

2.1 ปรับอุณหภูมิด้านเย็นของเครื่องยนต์จาก

ข้อมูลผลทดสอบตามเอกสาร [3] พบว่าอุณหภูมิด้านคูลเลอร์ของเครื่องยนต์ที่ระบุใน [2] มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง จึงได้ปรับปรุงการคำนวณอุณหภูมิด้านคูลเลอร์ของเครื่องยนต์ โดยประมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเครื่องยนต์และใช้อัตราไหลของน้ำหล่อเย็นที่ระบุใน [3] ซึ่งจะได้ค่าอุณหภูมิในคูลเลอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณของโปรแกรม

2.2 ปรับสมการสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากรูปแบบสมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและสมการความดันลดในรีเจนเนอเรเตอร์จาก [4] ซึ่งความดันลดในส่วนนี้จะมีผลอย่างมากต่อความแม่นยำของผลการคำนวณกำลังปั๊มของเครื่องยนต์ จากข้อมูลการทดสอบกำลังปั๊มของเครื่องยนต์ GPU-3 จาก [3] ได้นำมาคำนวณขนาดกำลังสูญเสียและความดันลดในรีเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งทำการคำนวณย้อน กลับ

ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตามสมการ (2.1) และนำไปใช้แทนค่าในสมการความดันลด (2.2)

$$C_f = \frac{151.2}{Re} + \frac{3.994}{Re^{0.103}} \quad (2.1)$$

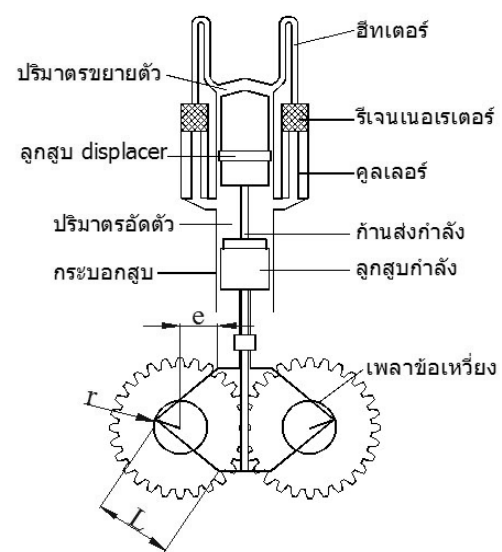
$$\Delta p = C_f \frac{L(1-\varepsilon)\rho}{d\varepsilon^2} u^2 \quad (2.2)$$

โดยที่ Re คือ เลขเรโนลด์ ρ คือความหนาแน่น Δp คือความดันลด L คือความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์ ε คือความพรุน d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดและ u คือความเร็วการไหลของสารทำงาน

สมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ปรับปรุงและสมการความดันลด ได้นำมาใช้แทนสมการที่ใช้ในโปรแกรมของ Ureili ซึ่งผลการคำนวณกำลังปั๊มของเครื่องยนต์ GPU-3 ด้วยโปรแกรมที่ปรับปรุงมีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลผลการทดสอบจริงอยู่ที่ 5%

3. กลไกขับเคลื่อนแบบรอมบิก

เครื่องยนต์สเตลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดี่ยว ที่ขับเคลื่อนโดยใช้กลไกแบบรอมบิก มีส่วนประกอบหลักดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์สเตลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดี่ยว

ตัวแปรและสมการของกลไกแบบรอมบิก

r = ระยะระหว่างจุดยึดกลไกและจุดหมุน

e = ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางการหมุนและแกนการเคลื่อนที่

L = ความยาวของก้านต่อ

สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณหาปริมาตรอัดและขยายและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรทั้งสองส่วนตามมุมหมุนของเพลลา θ

ปริมาตรอัด

$$V_c = V_{c1c} + 2A_p(b_1 - b_\theta) \quad (3.1)$$

เมื่อ V_{c1c} คือปริมาตรคงที่ ในส่วนอัด

ปริมาตรขยาย

$$V_e = V_{c1e} + A_d(b_\theta - b_2 - r \sin \theta) \quad (3.2)$$

เมื่อ V_{c1e} คือปริมาตรคงที่ ในส่วนขยาย

ค่าคงที่ในกลไก

$$b_1 = \sqrt{L^2 - (e - r)^2} \quad (3.3)$$

$$b_2 = \sqrt{(L - r)^2 - e^2} \quad (3.4)$$

$$b_3 = \sqrt{L^2 + (e + r)^2} \quad (3.5)$$

$$b_4 = \sqrt{(L + r)^2 - e^2} \quad (3.6)$$

ปริมาตรกวาดส่วนอัดและส่วนขยาย

$$V_{swc} = 2A_p(b_1 - b_2) \quad (3.7)$$

$$V_{swe} = 2A_d(b_{41} - b_2) \quad (3.8)$$

การเปลี่ยนแปลงปริมาตร

$$b_\theta = \sqrt{L^2 - (e + r \cos \theta)^2} \quad (3.9)$$

$$dV_c / d\theta = -2A_p r \sin \theta (e + r \cos \theta) / b_\theta \quad (3.10)$$

$$dV_e / d\theta = -(dV_c / d\theta) A_d / (2A_p) - A_d r \cos \theta \quad (3.11)$$

เมื่อ θ คือ มุมหมุนของเพลลา

อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบต่อระยะชัก (Bore/Stroke) เป็นตัวแปรหนึ่งที่น่าสนใจในการออกแบบเครื่องยนตโดยทั่วไป โดยปกติจะมีค่ามากกว่า 1 หรือเรียกว่า Over Square [3] ซึ่งหากค่านี้น้อยกว่าหนึ่งจะทำให้ลูกสูบต้องเคลื่อนที่

เป็นระยะที่มากขึ้นมีผลต่อการสึกหรอและความเสียหาย สำหรับเครื่องยนตสเตอร์ลิง ข้อมูลค่าอัตราส่วนเฉลี่ยจากเครื่องยนตที่มีการสร้างขึ้นจริง มีค่าเท่ากับ 2

4. การกำหนดตัวแปรในการออกแบบ

เครื่องยนตสเตอร์ลิงที่ใช้การเผาไหม้จากเชื้อเพลิงภายนอกสามารถเพิ่มปริมาณความร้อนให้แก่เครื่องยนตได้โดยเพิ่มการจ่ายเชื้อเพลิง แต่เมื่อใช้พลังงานอื่นซึ่งมีข้อจำกัด เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ จะมีข้อจำกัดความร้อนและอุณหภูมิที่ให้กับเครื่องยนตในการออกแบบนี้ต้องการให้เครื่องยนตสเตอร์ลิงทำงานได้กับอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนักจึง กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 500 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สามารถได้จากตัวรับแสงอาทิตย์ [5] โดยใช้ความดันเฉลี่ย และ สารทำงาน เช่นเดียวกับ เครื่องยนต GPU-3 ตามตารางที่ 1 ซึ่งข้อมูลนี้จะนำไปเป็นตัวแปรในการคำนวณ

เนื่องจากเครื่องยนตสเตอร์ลิง GPU-3 มีการออกแบบและผ่านการปรับปรุงจนทำงานได้จริง การออกแบบในที่นี้จะคำนวณหาอัตราส่วนกลไก ซึ่งก็คือการปรับเปลี่ยนปริมาตรให้เหมาะสมภายใต้ตัวแปรในการออกแบบที่กำหนด โดยขึ้นส่วนการหลักยังคงใช้แบบ GPU-3 เช่นเดิม

ตารางที่ 1 ตัวแปรในการทำงานของเครื่องยนตสเตอร์ลิงที่ออกแบบ

ตัวแปรการทำงาน	ค่า
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ	69.9 มม.
ช่วงชัก	31.2 มม.
ความดันเฉลี่ย	5.2 เมกะปาสคาล
อุณหภูมิตัวนำร้อน	500 °C
อุณหภูมิตัวนำเย็น	30 °C
ความเร็วรอบ	3,000 รอบต่อนาที

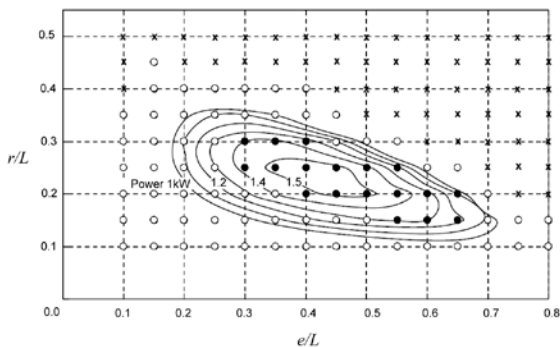
5. การหาอัตราส่วนกลไกที่เหมาะสม

สำหรับกลไกแบบรอมบิก อัตราส่วน e/L และ

r/L จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอัด และขยายของเครื่องยนต์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อกำลังบ่งชี้ที่ได้ เมื่อคำนวณแบบวนรอบโดยเปลี่ยนอัตราส่วน e/L ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.8 และ r/L ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.55 ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จะนำมาหาจุดที่ให้กำลังบ่งชี้สูงสุด

ผลการคำนวณกำลังบ่งชี้สำหรับคู่

อัตราส่วน e/L และ r/L นำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วน e/L และ r/L และกำลังบ่งชี้ที่ได้ แสดงตามรูปที่ 2 จุดตกบาทคือส่วนที่ไม่สามารถคำนวณหา กำลังบ่งชี้ได้ ซึ่งพบว่าอยู่ในช่วงที่มีสัดส่วน Bore/Stroke สูงกว่า 2 จุดวงกลมคือจุดที่คำนวณหา กำลังบ่งชี้ได้ โดยจุดสีดำคือจุดที่ให้กำลังบ่งชี้สูงสุด 18 อันดับแรก



รูปที่ 2 กราฟแสดงผลการคำนวณกำลังบ่งชี้ที่ค่า e/L และ r/L ต่างๆ

จากการพิจารณารูปที่ 2 พบว่ากราฟมีลักษณะของเส้นคอนทัวร์เป็นรูปวงรีเฉียง ซึ่ง ณ บริเวณใกล้จุดสูงสุด สามารถประมาณได้ด้วยสมการ (5.1) (วิธีการตามเอกสารอ้างอิง [6])

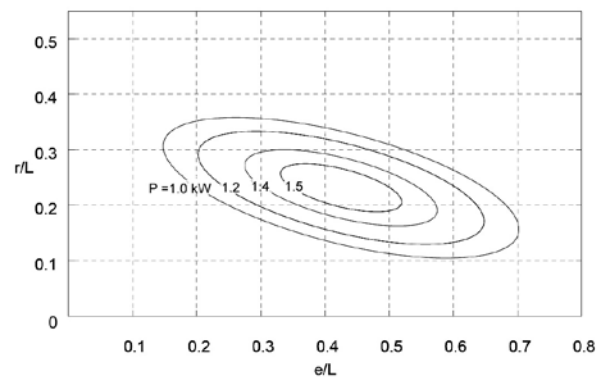
$$f(X_1, X_2) = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_1^2 + C_4 X_2^2 + C_5 X_1 X_2 \quad (5.1)$$

เมื่อ C_0 ถึง C_5 เป็นค่าคงที่ ฟังก์ชัน f แทนกำลังบ่งชี้ X_1 และ X_2 แทน ค่า e/L และ r/L ตามลำดับ ทำการตัดจุดที่ให้ค่าอัตราส่วน Bore/Stroke น้อยกว่า 2.0 และนำค่าที่เหลือเรียงลำดับกำลังบ่งชี้ที่ได้มากที่สุด 18 ลำดับแรกที่แสดงด้วยจุดสีดำในรูปที่ 2 มาเป็นข้อมูลในการฟิตสมการ ซึ่งจากการคำนวณโดยใช้วิธีความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด [5] ได้ค่า

ของสัมประสิทธิ์ $C_0 = -6,282.21$ $C_1 = 16,435.55$

$C_2 = 37,619.23$ $C_3 = -11,337.2$ $C_4 = -54,279.7$

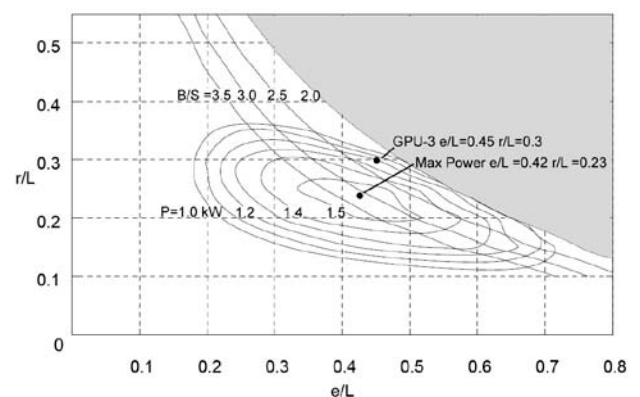
และ $C_5 = -29,364.3$ กราฟของสมการที่ได้แสดงตามรูปที่ 3 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดจากข้อมูลผลการคำนวณอยู่ที่ 1.5%



รูปที่ 3 กราฟจากสมการ (5.1)

จากสมการที่ได้สามารถนำมาหาค่าสูงสุดได้ โดยการตั้งค่าของอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของสมการที่หนึ่งให้เป็นศูนย์ ซึ่งจะได้ค่าของ e/L และ r/L ที่ให้กำลังสูงสุดคือ 0.42 และ 0.23 ตามลำดับ โดยค่านี้จะนำไปใช้เพื่อกำหนดระยะของกลไกการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์ต่อไป

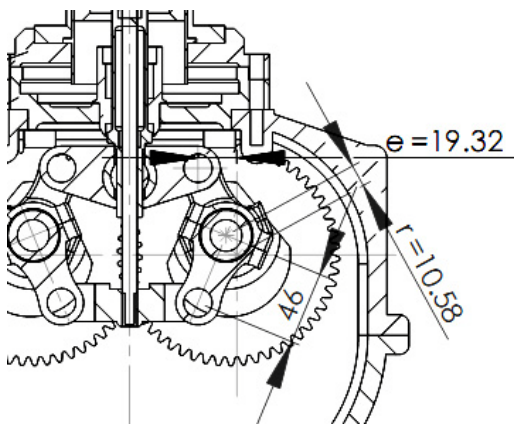
รูปที่ 4 แสดงค่า e/L และ r/L ที่ได้จากการคำนวณ และเปรียบเทียบกับค่าเดิมของเครื่องยนต์ GPU-3 ซึ่งมีค่ากำลังบ่งชี้ที่ 1,200 วัตต์ กำลังบ่งชี้อัตราส่วนใหม่จะให้กำลังบ่งชี้ที่ 1,566 วัตต์ เพิ่มขึ้นจากเดิม 30%



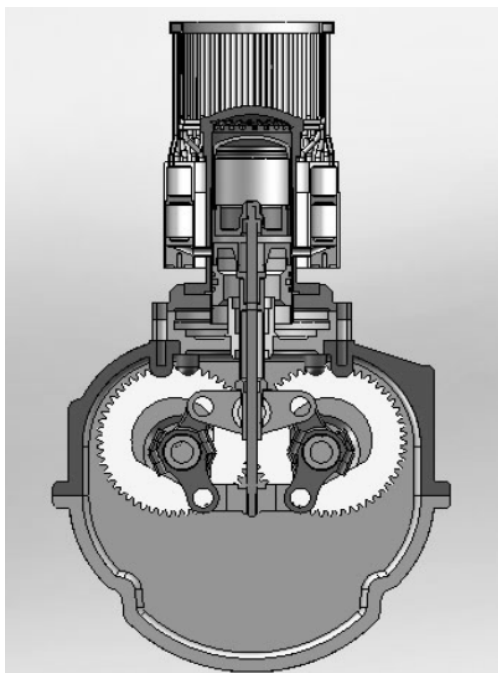
รูปที่ 4 ผลการคำนวณอัตราส่วน e/L และ r/L ที่ให้กำลังบ่งชี้สูงสุด

จากอัตราส่วนกลไกที่ได้นี้ จะนำมาออกแบบ เครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยใช้รูปแบบจากเครื่องยนต์ GPU-3 และใช้อัตราส่วนของระยะของกลไกขับเคลื่อน ตามที่ได้ โดยที่ $L = 46.0$ มม. จะได้ระยะของ e และ r คือ 19.32 และ 10.58 มม.ตามลำดับ โดย ชิ้นส่วนหลักของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ได้ออกแบบโดย ใช้ระยะกลไกที่คำนวณได้แสดงตามรูปที่ 5

ระยะ e และ r และ L ของกลไกขับเคลื่อน รอมบิกที่ได้จากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ระยะที่เหมาะสมของกลไกโรมบิก



รูปที่ 5 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ทำการออกแบบ

6. สรุป

งานวิจัยนี้ นำโปรแกรมคำนวณกำลังบ่งชี้ของ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นจาก แบบจำลองของ Urieli มาใช้ในการคำนวณหาระยะที่ เหมาะสมของกลไกขับเคลื่อนแบบรอมบิกของ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดี่ยวโดยใช้ สัดส่วนของเครื่องยนต์ GPU-3 เป็นค่าเริ่มต้น โดย ระยะที่เหมาะสมที่ค้นพบจะให้ค่ากำลังบ่งชี้เพิ่มขึ้นถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการที่โปรแกรมดังกล่าวมีความ คลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์เมื่อใช้กับเครื่องยนต์ GPU-3 จึงมีแนวโน้มที่เป็นไปได้ว่าการใช้สัดส่วนที่ เหมาะสมตามที่ยกแบบจะทำให้เครื่องยนต์มีกำลัง สูงขึ้นตามผลการคำนวณ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] พงศ์สินธุ์ ธนวัฒน์เสรี และ ดุลยโชติ ชลศึกษ์ การศึกษาการคำนวณ กำลังบ่งชี้จากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดี่ยว การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 2551
- [2] Urieli, U., Berchowitz, D. M., Stirling Cycle Machine Analysis, Adam Hilger Ltd., 1984.
- [3] Lanny, G., Thieme., Low-power baseline test results for the GPU 3 Stirling engine, National Aeronautics and space administration, Lewis Research Center, Ohio. April 1979.
- [4] Thomas, B.: Update of the evaluation of difference correlation for the flow friction factor and heat transfer of Stirling engine regenerators , AIAA, 2000
- [5] Geyer, M. Eurotrough - Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation, Symposium on Concentration Solar Power and Chemical Energy Technologies, September 4-6, 2002, Zurich, Switzerland.

[6] Cholaseuk, D., Robust Optimum Design of Mechanical Parts, Ph.D. thesis, Columbia University, 2001