การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22
15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

การศึกษาการคำนวณกำลังบ่งชี้จากเครื่องยนต์สเตอลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดียว

A Study on Calculation of an Indicated Power of a Single Cylinder Beta-Type Sterling Engine

พงศ์สินธุ์ ธนวัฒน์เสรี[1]* ดุลยโชติ ชลศึกษ์[2]
[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120
โทร 0-2564-3001 โทรสาร 0-2564-3001 *อีเมล์ phongsin@gmail.com

บทคัดย่อ

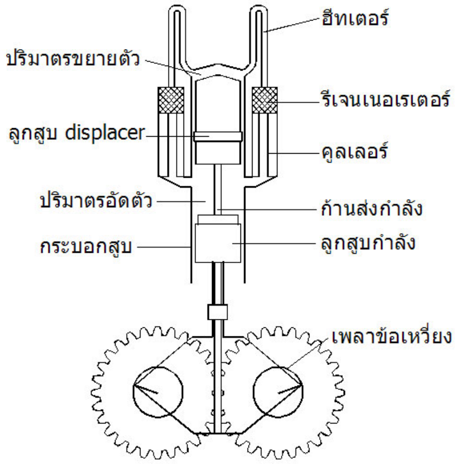
บทความนี้เสนอการใช้โปรแกรมคำนวณเพื่อหากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์สเตอลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดียวโดยใช้ข้อมูลจำเพาะและผลการทดสอบของเครื่องยนต์สเตอลิง GPU-3 ซึ่งใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงาน ที่ความดัน 5.12 เมกะปาสคาล อุณหภูมิด้านร้อน 649 °C และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 15 °C วิธีการคำนวณที่ใช้เป็นการปรับปรุงการคำนวณจากโปรแกรมของ Ureili โดยได้รวมการพิจารณาถึงอุณหภูมิของคูลเลอร์ที่เพิ่มขึ้นและการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรีเจนเนอเรเตอร์จากข้อมูลจากผลการทดสอบและนำผลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้นี้มาตรวจสอบโดยใช้ประกอบการคำนวณหากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ Allison PD-46 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์รูปแบบเดียวกัน

Abstract

This article presents a procedure for calculation of an indicated power of a single cylinder Beta-type Stirling engine.The calculation is based on the specification and testing data of GPU-3 Engine, which uses helium as working fluid at mean pressure 5.12 MPa, heater gas temperature of 649 °C and cooling water temperature of 15 °C. Ureili's program is modified by reconsidering the temperature rise in the cooler and applying the friction coefficient equation in the regenerator. The friction coefficient is computed from the engine's test data. The calculation is validated with the test data from another engine with same configuration, the Allison PD-46.

1. บทนำ

เครื่องยนต์สเตอลิงเป็นเครื่องยนต์ที่ทำงานโดยการขยายตัวของก๊าซร้อน ประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี คศ.1816 โดยโรเบิร์ต สเตอลิง ซึ่งมีข้อดีคือสามารถใช้กับแหล่งความร้อนได้หลากหลาย เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล ความร้อนเหลือทิ้งจากการผลิต หรือ พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในต่างประเทศได้มีการวิจัยและสร้างเพื่อใช้ในงานด้านต่าง ๆ เครื่องยนต์สเตอลิงแบบเบต้าเป็นรูปแบบหนึ่งของเครื่องยนต์สเตอลิงที่มีความน่าสนใจ ภายในเครื่องยนต์สเตอลิงโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนการทำงาน หลักได้แก่ ส่วนปริมาตรขยาย ฮีทเตอร์ รีเจนเนอเรเตอร์ คูลเลอร์ และส่วนปริมาตรอัด สำหรับเครื่องยนต์แบบเบต้ากระบอกสูบเดียว เช่น เครื่องยนต์ GPU-3 มีชิ้นส่วนหลักดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์ GPU-3

การศึกษาการคำนวณเพื่อการออกแบบเป็นขั้นตอนเบื้องต้นซึ่งมีความสำคัญ แต่จากเอกสารหรือโปรแกรมคำนวณตามเอกสาร [1] และ [2] พบว่าผลการคำนวณกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์โดยใช้โปรแกรมยังมีความผิดพลาดสูง ในงานวิจัยนี้จึงได้พยายามทำการปรับปรุงโปรแกรมของ Ureili [1] ซึ่งเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม MatLabโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบเครื่องยนต์ GPU-3 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์สเตอลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดียวในการปรับแก้การคำนวณความดันลดซึ่งมีผลจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรีเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งมีผลอย่างมากต่อผลลัพธ์ของกำลังบ่งชี้ที่คำนวณได้ของเครื่องยนต์สเตอลิง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาขั้นตอนการคำนวณหากำลังบ่งชี้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และปรับปรุงให้สามารถทำนายผลกำลังบ่งชี้ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ และสามารถประยุกต์ใช้

สำหรับออกแบบเครื่องยนต์สเตอลิงที่มีรูปแบบเดียวกันต่อไป

2. การคำนวณของโปรแกรม

การวิเคราะห์เพื่อคำนวณหากำลังของเครื่องยนต์สเตอลิง อาจแบ่งได้เป็น 4 อันดับ คือ

อันดับที่ศูนย์ คือการวิเคราะห์โดยการประมาณโดยใช้สมการประเมินโดยใช้ค่าจากประสบการณ์

อันดับที่หนึ่ง คือการวิเคราะห์โดยการใช้แบบจำลอง เช่น แบบอุณหภูมิคงที่ หรือแบบจำลองอะเดียบาติก ซึ่งไม่คิดการสูญเสียต่างๆ

อันดับที่สอง คือการวิเคราะห์โดยใช้ผลจากการวิเคราะห์ในระดับที่หนึ่งโดยรวมการพิจารณาการสูญเสีย เช่น การสูญเสียจากความดันลดในชิ้นส่วน การสูญเสียจากการนำความร้อน เป็นต้น

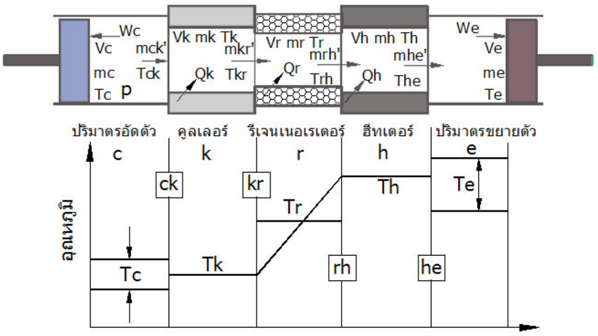
อันดับที่สาม คือการวิเคราะห์โดยแบ่งพิจารณาภายในเครื่องยนต์เป็นส่วนย่อยๆ และแก้สมการหาคาตัวแปรที่จุดต่อ วิธีนี้เหมาะกับการวิเคราะห์เครื่องยนต์อย่างละเอียด

ในการออกแบบเครื่องยนต์โดยทั่วไปจะใช้การวิเคราะห์ระดับที่สอง [3] โดยอาจใช้สมการจากแบบจำลองอุณหภูมิคงที่หรือที่เรียกว่าสมการของSchmidt หรือใช้แบบจำลองอะเดียบาติกซึ่งทั้งสองแบบเป็นการคำนวณหางานโดยไม่คิดการสูญเสียจากความดันลดหรืออื่นๆ ในโปรแกรมคำนวณชื่อ Simple ของ Ureili [1] ซึ่งนำมาปรับปรุงในงานวิจัยนี้ จะคำนวณหากำลังบ่งชี้โดยเริ่มจากการคำนวณแบบอะเดียบาติกและคำนวณอุณหภูมิที่ลดลงจากผลของประสิทธิภาพของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน(กำลังขั้นต้น)และงานที่สูญเสียไปจากความดันลดในตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

กำลังบ่งชี้ = กำลังขั้นต้น - งานที่สูญเสียไปจากความดันลด

2.1 แบบจำลองอะเดียบาติก

แบบจำลองอะเดียบาติก[1] เป็นแบบจำลองที่ใช้เพื่อหาสมการสำหรับ ใช้ในการคำนวณหางานและความร้อนในเครื่องยนต์สเตอลิงโดยพิจารณาเครื่องยนต์โดยการแบ่งย่อยเป็น 5 ส่วนดังรูป โดยตัวห้อย $h\ k\ r\ c$ และ e แทนฮีทเตอร์ คูลเลอร์ รีเจนเนอเรเตอร์ ปริมาตรส่วนอัดและส่วนขยาย ตามลำดับโดยส่วนระหว่างขอบเขตปริมาตรใช้ตัวแปรระหว่างส่วนนั้นๆ เช่น ck แทนส่วนขอบเขตของส่วนอัดและคูลเลอร์ มีทั้งหมด 4 ขอบเขตคือ $ck\ kr\ rh$ และ he



รูปที่ 2 ตัวแปรและการแบ่งส่วนปริมาตรตามแบบจำลองอะเดียบาติก

จากสมการมวล พลังงาน และเงื่อนไขตามทิศทางการไหล โดยพิจารณาสารทำงานเป็นก๊าซอุดมคติ ได้สมการทั้งหมดตามลำดับที่แสดงด้านล่าง ซึ่งสมการเหล่านี้จะนำมาคำนวณเพื่อนำไปสู่การหางานและความร้อนที่ให้กับเครื่องยนต์

สมการที่ได้ตามแบบจำลองอะเดียบาติก

สมการพลังงาน

$$dT_e = T_e(\frac{dp}{p} + \frac{dV_e}{V_e} - \frac{dm_e}{m_e})$$

$$dT_c = T_c(\frac{dp}{p} + \frac{dV_c}{V_c} - \frac{dm_c}{m_c})$$

$$dQ_k = \frac{V_k \cdot dp \cdot cv}{R} - cp(T_{ck} \cdot m_{ck}' - T_k \cdot m_{kr}')$$

$$dQ_r = \frac{V_r \cdot dp \cdot cv}{R} - cp(T_k \cdot m_{kr}' - T_h \cdot m_{krh}')$$

$$dQ_h = \frac{V_h \cdot dp \cdot cv}{R} - cp(T_h \cdot m_{rh}' - T_{he} \cdot m_{he})$$

$$dW_c = pdV_c$$

$$dW_e = pdV_e$$

สมการความดัน

$$p = MR / \left(\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_e} \right) \quad (2.1)$$

$$dp = \frac{-\gamma \cdot p(dV_c / T_{c-k} + dV_e / T_{h-e})}{\frac{V_c}{T_{c-k}} + \gamma\left(\frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h}\right) + \frac{V_e}{T_{h-e}}} \quad (2.2)$$

สมการมวล

$$m_i = pV_i / RT_i \quad (2.3)$$

โดยที่ i=1-5 สำหรับปริมาตรทั้ง 5

สมการการเปลี่ยนแปลงมวล

$$dm_c = (pdV_c + V_c dp / \gamma) / (RT_{c-k}) \quad (2.4)$$

$$dm_e = (pdV_e + V_e dp / \gamma) / (RT_{h-e}) \quad (2.5)$$

$$dm_i = dp(\frac{m_i}{p}) = \frac{dp}{R}(\frac{V_i}{T_i}) \quad (2.6)$$

โดยที่ i=1-3 สำหรับปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงทั้งสามส่วน

การไหลของก๊าซระหว่างขอบเขตปริมาตร

$$m_{ck} = -dm_c\ ,\quad m_{kr} = -m_{ck} - dm_k \quad (2.7),(2.8)$$

$$m_{he} = -dm_e\ ,\quad m_{rh} = -m_{he} - dm_h \quad (2.9),(2.10)$$

ค่าอุณหภูมิตามทิศทางการไหล

ถ้า $m_{c-k} > 0$, $T_{ck} = T_c$ มิเช่นนั้น $T_{ck} = T_k$ (2.11)

ถ้า $m_{he} > 0$, $T_{he} = T_h$ มิเช่นนั้น $T_{he} = T_e$ (2.12)

2.2 ขั้นตอนการหาผลลัพธ์

จากสมการที่ได้แสดงในหัวข้อ 2.1 มีขั้นตอนการหาผลลัพธ์ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการหาผลลัพธ์

ขั้นตอนการหาผลลัพธ์	ผลลัพธ์ที่ทราบค่า
1.กำหนดอุณหภูมิด้านร้อน ด้านเย็น ปริมาตรอัดตัวและขยายตัว และก๊าซที่เป็นสารทำงาน	$T_h, T_k, T_r, V_c, V_e, c_p, c_v$
2.หาการเปลี่ยนแปลงปริมาตร	dV_c , dV_e
3.กำหนดค่าเริ่มต้น	$T_{c_0}, T_{e_0}, Q_{k_0}, Q_{r_0}, Q_{h_0}$ W_{c_0}, W_{e_0}
4.คำนวณค่าความดันและการเปลี่ยนแปลงความดัน	p, dp สมการ 2.1 และ 2.2
5.หามวลของก๊าซในแต่ละส่วนจากสมการมวล	m_c, m_k, m_r m_h, m_e สมการ 2.3
6.หาการเปลี่ยนแปลงมวลของก๊าซในแต่ละส่วน	dm_c, dm_k, dm_r dm_h, dm_e สมการ 2.4-2.6
7.การไหลของก๊าซระหว่างขอบเขตปริมาตร	m_{ck}, m_{kr} m_{he}, m_{rh} สมการ 2.7-2.10
8.ค่าอุณหภูมิตามทิศทางการไหล	T_{ck} , T_{he} สมการ 2.11-2.12
9.นำเวคเตอร์ของค่าตัวแปรอินทิเกรตเชิงตัวเลขในแต่ละช่วงมุมหมุนของเครื่องยนต์จนค่าอุณหภูมิ T_c และ T_e เข้าสู่ค่าเริ่มต้น	ค่าของตัวแปรทุกตัวที่เหลือ

3. ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์และผลการทดสอบ

เครื่องยนต์ GPU-3 (Ground power unit) และ Allison PD-46 เป็นเครื่องยนต์สเตอลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดียวซึ่งใช้รูปแบบของกลไกขับเคลื่อนแบบเดียวกัน และใช้ฮีทเตอร์ รีเจนเนอเรเตอร์ คูลเลอร์ รูปแบบเดียวกัน เครื่องยนต์สร้างขึ้นโดยบริษัทเจเนอรัลมอเตอร์เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าและนำมาดัดแปลงเพิ่มเติมเพื่อใช้ทดสอบโดยศูนย์วิจัยลูอิส เพื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของศูนย์วิจัยที่ได้พัฒนาขึ้น

ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ทั้งสองแบบ แสดงดังในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ข้อมูลผลการทดสอบ เครื่องยนต์ทั้งสองเครื่องมีผลการ**ทดสอบโดยสรุปจากเอกสาร [2],[4] และ** [6] **ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยในเครื่องยนต์ GPU-3 อุณหภูมิคูลเลอร์ที่ระบุเป็นอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในคูลเลอร์**

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ GPU-3 [2],[4]

รูปแบบของเครื่องยนต์	แบบเบต้า สูบเดียว
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ × ช่วงชัก	69.9 × 31.2 มม
สารทำงาน	ฮีเลียม
ความดันสารทำงาน	5.52 เมกะปาสคาล
ความเร็วรอบต่อนาที	2500 3000 3500
อุณหภูมิด้านฮีทเตอร์	922 เคลวิน
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	288 เคลวิน
อัตราไหลของน้ำหล่อเย็น	0.19 กก.ต่อนาที
ปริมาตรกวาด,ปริมาตรนิ่งด้านขยาย	124.9,12.28 ซีซี
ปริมาตรกวาด,ปริมาตรนิ่งด้านอัด	211.9,11.51 ซีซี
ϕ ในท่อฮีตเตอร์×ความยาว	3.02× 245.3 มม.
ϕ ในท่อคูลเลอร์×ความยาว	1.08× 46 มม.
ϕ รีเจนเนอเรเตอร์×ความยาว	22.6× 22.
ความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์,ขนาดลวด	0.697,0.04 มม.
จำนวนฮีตเตอร์,คูลเลอร์,รีเจนเนอเรเตอร์	40, 312, 8

ตารางที่ 3 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ Allison PD-46 [5],[6]

รูปแบบของเครื่องยนต์	แบบเบต้า สูบเดียว
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ × ช่วงชัก	60.325 × 28.4 มม
สารทำงาน	ฮีเลียม
ความดันสารทำงาน	10 เมกะปาสคาล
ความเร็วรอบต่อนาที	2500 3000
อุณหภูมิด้านฮีทเตอร์	1024 เคลวิน
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	339 เคลวิน
อัตราไหลของน้ำหล่อเย็น	0.25 กก.ต่อนาที
ปริมาตรกวาด,ปริมาตรนิ่งด้านขยาย	81.17,13.49 ซีซี
ปริมาตรกวาด,ปริมาตรนิ่งด้านอัด	81.17,77.57 ซีซี
ϕ ในท่อฮีตเตอร์×ความยาว	1.83× 104 มม.
ϕ ในท่อคูลเลอร์×ความยาว	1.016× 66 มม.
ϕ รีเจนเนอเรเตอร์×ความยาว	20.32× 20.32
ความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์,ขนาดลวด	0.690,0.04 มม.
จำนวนฮีตเตอร์,คูลเลอร์,รีเจนเนอเรเตอร์	96, 152, 8

ตารางที่ 4 ข้อมูลกำลังที่ได้จากการทดสอบ GPU-3 และ Allison PD-46 จากเอกสาร [2],[4] และ [6]

ความเร็วรอบต่อนาที	GPU-3			Alisson-PD46	
	2500	3000	3500	2500	3000
ความดัน (MPa)	5.12	5.12	5.12	10	10
อุณหภูมิฮีทเตอร์(K)	922	922	922	933	933
อุณหภูมิคูลเลอร์(K)	288*	288*	288*	338	338
ความร้อนที่ให้(W)	14690	17450	19180	15000	16970
กำลังสุทธิ(W)	3280	3280	2760	4050	4140
กำลังบ่งชี้(W)	4490	4681	4352	5920	6230

4. การปรับปรุงโปรแกรมการคำนวณ

จากโปรแกรมการคำนวณของ Ureili[1] ได้นำมาปรับปรุงเพื่อให้ใช้กับการคำนวณเครื่องยนต์สเตอลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดียวโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การปรับอุณหภูมิที่ให้กับเครื่องยนต์

สำหรับเครื่องยนต์ GPU-3 อุณหภูมิด้านเย็น จาก[2] ข้อมูลที่ระบุจากการทดสอบเป็นอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นซึ่งจมีค่าประมาณ15°Cแต่ค่าที่ต้องการใช้เริ่มในการคำนวณต้องใช้ค่าอุณหภูมิที่ผิวท่อคูลเลอร์ซึ่งได้ปรับแก้โดยคำนวณอุณหภูมิโดยประมาณของคูลเลอร์โดยความร้อนที่ถ่ายเทออกจากคูลเลอร์ในเครื่องยนต์สเตอลิงโดยทั่วไป จะอยู่ที่ 50% ของความร้อนที่ให้กับเครื่องยนต์ [3] ซึ่งจากข้อมูลอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและสมการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของกลุ่มท่อ [7] จะนำมาคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำและอุณหภูมิที่ผิวท่อ

$$Re_l = \frac{\rho u_m l}{\mu} \qquad (4.1)$$

$$Nu_l = \frac{hl}{k} \qquad (4.2)$$

โดยที่ Re_l คือเรย์โนลด์นัมเบอร์ u_m คือความเร็วการไหลของน้ำ μ คือความหนืดจลน์ k คือค่าการนำความร้อน h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และ $l = \frac{\pi}{2} D$ ซึ่งจะนำมาคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้จาก

$$q' = N(hD\Delta T) \qquad (4.3)$$

เมื่อ N คือจำนวนท่อ ซึ่งจะได้ผลของอุณหภูมิคูลเลอร์ที่ความเร็วรอบ 2500 3000 3500 รอบต่อนาที คือ 65 74 และ 80 °C ตามลำดับ

4.2ปรับสมการสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

สำหรับการคำนวณความดันลดในรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบจะมีขนาดสูงกว่าความดันลดในฮีทเตอร์และรีเจนเนอเตอร์และมีผลต่อการคำนวณกำลังบ่งชี้เครื่องยนต์มากที่สุด[1]

โดยใช้สมการจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน[8]ซึ่งได้จากผลการทดสอบรีเจนเนอเรเตอร์ในชุดทดสอบซึ่งสร้างขึ้นโดยเฉพาะ

$$C_f = \frac{129}{Re} + \frac{2.91}{Re^{0.103}} \qquad (4.4)$$

และสมการความดันลด

$$\Delta p = C_f \frac{L(1-\varepsilon)\rho}{d\varepsilon 2} u^2 \qquad (4.5)$$

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

4.3 ปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรีเจนเนอเรเตอร์

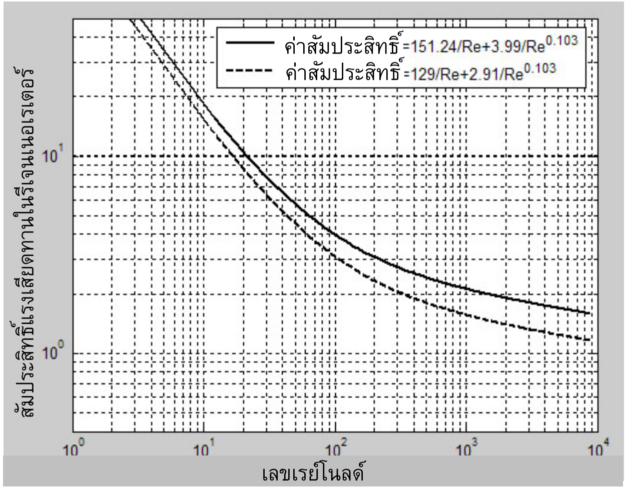
จากผลการคำนวณที่จากหัวข้อ 4.2 ได้ทำการปรับปรุงโดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ เพื่อให้ได้ผลแตกต่างจากผลการทดสอบที่น้อยลงและให้ลักษณะของกราฟสอดคล้องกับผลการคำนวณ ซึ่งได้จากการคำนวณงานที่สูญเสีย โดยพิจารณาจาก

กำลังขั้นต้น(จากโปรแกรม)-กำลังบ่งชี้(จากการทดสอบ)=งานที่สูญเสีย

งานที่สูญเสีย/ความเร็วรอบต่อวินาที=งานที่สูญเสียในการหมุนต่อรอบ และงานที่สูญเสียต่อรอบ=ความดันลด(Δp)×การเปลี่ยนแปลงปริมาตรขยาย(ΔV_e) [1]

ซึ่งความดันลดที่ได้จากงานที่สูญเสียได้นำมาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน C_f จากสมการระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และ $C_f = \frac{a}{Re} + \frac{b}{Re^{0.103}}$ โดยคำนวณหาค่าคงที่ a และ b ด้วยวิธีความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (least square error method) ซึ่งได้ผลลัพธ์ ค่าคงที่ a และ b คือ 151.2 และ 3.994 ตามลำดับ

เมื่อนำค่า a และ b จากสมการ 4.4 และค่าคงที่ที่คำนวณได้ มาแทนลงในสมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ได้กราฟระหว่างเลขเรย์โนลด์และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรีเจนเนอเรเตอร์ ของค่าเดิมและค่าที่คำนวณได้ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบผลค่าจากสมการที่ทำการปรับแก้และค่าเดิม

5. ผลการคำนวณ

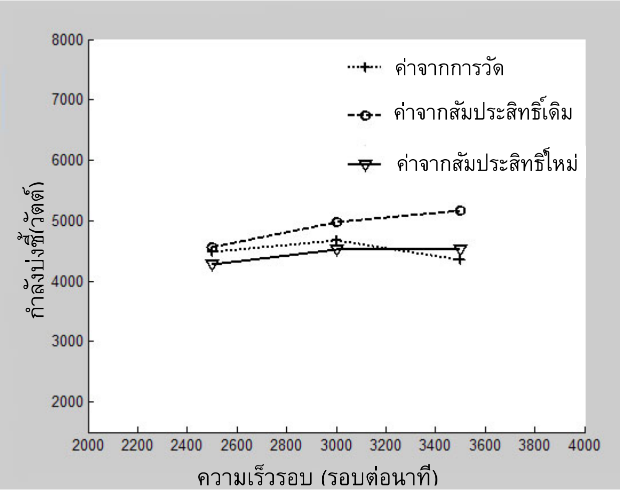
ผลลัพธ์จากการคำนวณกำลังบ่งชี้หลังจากการปรับปรุงวิธีการตามหัวข้อที่ 4 เมื่อเทียบกับผลการทดสอบของเครื่องยนต์ GPU-3 และเครื่องยนต์ Allison PD-46 เป็นดังต่อไปนี้

5.1 ผลการคำนวณของโปรแกรมเทียบกับข้อมูลการทดสอบเครื่องยนต์ GPU-3

จากการปรับค่าอุณหภูมิของคูลเลอร์และคำนวณความดันลดจากจากสมการ 4.4 และ 4.5 ได้ผลการคำนวณกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ GPU-3 ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งจะเห็นว่าการคำนวณกำลังบ่งชี้โดยใช้การสมการจาก 4.4 และ 4.5 จะได้ผลของกำลังบ่งชี้ที่เพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มความเร็วรอบ แต่กราฟจากผลการทดสอบจะมีจุดสูงสุดที่ 3000 รอบจากนั้นกำลังจะจะลดลง ซึ่งจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการคำนวณกำลังที่ได้จากค่าคงที่ที่ได้ จากหัวข้อ 4.3 จากการปรับคำนวณความดันลดจากสมการที่ได้จากการคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานย้อนกลับได้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ ±5%

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณกำลังบ่งชี้เครื่องยนต์ GPU-3

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	กำลังบ่งชี้จากการทดสอบ (วัตต์)	กำลังบ่งชี้จากการสมการ 4.4 (วัตต์)	กำลังบ่งชี้จากการปรับแก้ (วัตต์)
2500	4490	4562 (-2%)	4269.3 (5%)
3000	4681	4982 (-6%)	4530.9 (3%)
3500	4352	5168 (-19%)	4514.5 (-4%)



รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานค่าเดิมและค่าที่ปรับแก้

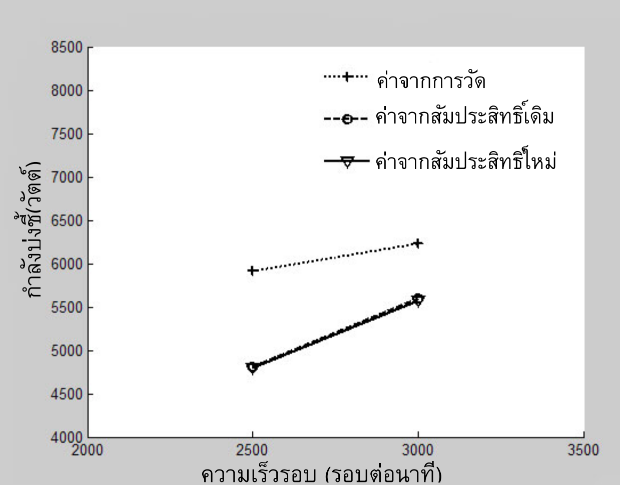
5.2 ผลการคำนวณของโปรแกรมเทียบกับข้อมูลการทดสอบเครื่องยนต์ Allison PD-46

จากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้ในหัวข้อ 4.3 และทดสอบใช้คำนวณใน 5.1 พบว่าผลการคำนวณใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบจึงนำค่านี้มาใช้ในการคำนวณหากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ Aliison-PD46 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่มีรูปแบบเดียวกับเครื่องยนต์ GPU-3 แต่แตกต่างกันในแง่มิติขนาดต่างๆ และตัวแปรในการทำงาน ตารางที่ 7 แสดงผลการคำนวณกำลังบ่งชี้เครื่องยนต์ Allison PD-46

จากการนำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรีเจนเนอเรเตอร์มาคำนวณในเครื่องยนต์ Allison PD-46 ที่ความเร็วรอบ 2500 และ 3500 โดยใช้สมการที่ปรับแก้มีค่าความผิดพลาด 19.1% และ 10.6% ตามลำดับหรือเฉลี่ยเท่ากับ15% ดังแสดงในตารางที่ 7 ผลของการคำนวณโดยใช้ค่าจากสัมประสิทธิ์เดิมและสัมประสิทธิ์ใหม่ ได้ผลการคำนวณกำลังต่างกันน้อยมาก กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 5

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณเครื่องยนต์ Allison PD-46

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	กำลังบ่งชี้จากการทดสอบ (วัตต์)	กำลังบ่งชี้จากการสมการ 4.4 (วัตต์)	กำลังบ่งชี้จากการปรับแก้ (วัตต์)
2500	5920	4811(18.7%)	4792(19.1%)
3000	6230	5596(10.2%)	5571(10.6%)



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ Allison PD-46 ระหว่างค่าจากการวัดและค่าจากการคำนวณ

6. สรุป

จากการศึกษาการคำนวณและปรับปรุงการคำนวณของโปรแกรมพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อกำลังของเครื่องยนต์ นอกจากอุณหภูมิด้านร้อน ความดัน และความเร็วรอบ แล้วได้ข้อสรุปคือ

1.ผลของอุณหภูมิด้านเย็นที่มีผลสำคัญในการคำนวณกำลังเบื้องต้นของเครื่องยนต์ ซึ่งในการคำนวณเพื่อออกแบบเครื่องยนต์จริงต้องคำนึงถึงการออกแบบระบบหล่อเย็นที่เหมาะสม

2.ผลของการคำนวณความดันลดในรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งเป็นผลจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน มีผลอย่างมากกับความถูกต้องใน

การคำนวณหาค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ การออกแบบ เลือกใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่เหมาะสมจึงมีผลกับกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์

3.ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่ปรับปรุงของเครื่องยนต์นี้มีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปปรับใช้กับการคำนวณประเมินกำลังเครื่องยนต์สเตอลิงที่มีลักษณะเดียวกันนี้ในขั้นตอนการออกแบบได้

ผู้วิจัยจะได้นำวิธีการคำนวณนี้ไปทำการออกแบบสัดส่วนที่เหมาะสมของเครื่องยนต์สเตอลิงเพื่อให้ได้กำลังบ่งชี้สูงสุดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Urieli, U., Berchowitz, D. M., “Stirling Cycle Machine Analysis", Adam Hilger Ltd., Bristol, 1984
2. Martini W.R.,Stirling Engine Design Manual 2rd edition,Martini Engineering Publication
3. Walker G.,Stirling Engine,Clarendon Press Oxford 1980 น. 212
4. Lanny, G., Thieme., "Low-power baseline test results for the GPU 3 Stirling engine, Nationnal Aeronautics ans space administration,Lewis Research Center,Ohio April 1979
5. Organ A J.,The Regenerator and the Stirling Engine Professional Engineering Publishing.,1997
6. Hargreaves C.M. .,The Phillips Striing Engine,Elsevier science Publishers B.V.,1991
7. Spang B., Correlations for Convective Heat Transfer http://www.cheresources.com/convection.shtml
8. Thomas, B.:Update of the evaluation of difference correlation for the flow friction factor and heat transfer of stirling engine regenerators ,AIAA,2000