

บทที่ 4

การปรับปรุงโปรแกรมการคำนวณ

จากผลการสอบทวนการคำนวณโดยโปรแกรมของ Urieli ที่ได้กล่าวถึงแล้ว แสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณยังแตกต่างจากผลการทดสอบมาก จึงทำการปรับปรุงโปรแกรมการคำนวณเพื่อให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดสอบและนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องยนต์ สเตอริงแบบเบต้าลูกสูบเดี่ยวต่อไปได้ ผลการคำนวณของโปรแกรม โดย Urieli [1] และ ข้อมูลจากการวัด [4] ได้นำมาสู่การปรับปรุงโปรแกรมการคำนวณ

4.1 การปรับอุณหภูมิส่วนเคลเลอร์ของเครื่องยนต์

สำหรับเครื่องยนต์ GPU-3 อุณหภูมิด้านเย็นจาก [2] ข้อมูลที่ระบุจากการทดสอบ เป็นอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นซึ่งจะมีค่าประมาณ 13 องศาเซลเซียส ซึ่ง Urieli [1] ได้ใช้ค่าของอุณหภูมินี้ในการกำหนดอุณหภูมิด้านเย็น แต่ค่าที่ต้องการใช้เริ่มในการคำนวณตามแบบจำลองต้องใช้ค่าอุณหภูมิที่ผิวท่อเคลเลอร์ จึงได้ปรับแก้อุณหภูมิโดยการคำนวณอุณหภูมิโดยประมาณของเคลเลอร์ จากความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเคลเลอร์ในเครื่องยนต์สเตอริง GPU-3 ตามหัวข้อ 3.2.2 จะอยู่ที่ 43% ของความร้อนที่ให้กับเครื่องยนต์ จากผลการทดสอบตามเอกสาร [2] ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและสมการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลผ่านกลุ่มท่อ[13] จะนำมาใช้ในการคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำและอุณหภูมิที่ผิวท่อ

$$Re = \frac{\rho u_m l}{\mu} \quad (4.1)$$

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

โดยที่ Re คือเลขเรย์โนลด์ u_m คือความเร็วการไหลของน้ำ μ คือความหนืดจลน์ k คือค่าการนำความร้อน h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และ $l = \frac{\pi}{2}D$ เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ซึ่งจะนำมาคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้จาก

$$q = N(hA\Delta T) \quad (4.3)$$

เมื่อ N คือจำนวนท่อ A คือพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนและ ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะได้ ผลการคำนวณของอุณหภูมิเคลเลอร์ที่ความเร็วรอบ 2,500 3,000 3,500 รอบต่ออนาที

คือ 65 74 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4.2 การปรับสมการความดันลดและสมการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

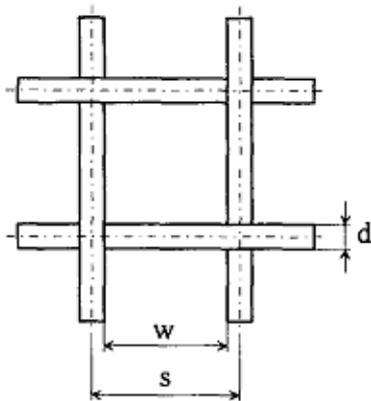
ผลจากการคำนวณความดันลดในรีเจนเนอเรเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบจะมีขนาดสูงกว่าความดันลดในฮีทเตอร์และคูลเลอร์ ซึ่งจะมีผลต่อกำลังปั๊มที่ได้อุปกรณ์มากที่สุด [1] ความดันลดที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้กำลังปั๊มที่ได้จากเครื่องยนต์ลดลง ตัวแปรที่สำคัญคือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction factor) ในโปรแกรม Simple ของ Urelli [3] สมการที่ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานใช้ตามสมการที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.3.4 ไม่ได้นำมาจากการทดสอบโดยการไหลของสารทำงานแบบไปกลับซ้ำ ๆ กัน (oscillating-flow) แบบที่เกิดขึ้นจริงในเครื่องยนต์สเตอจิง จากเอกสาร [14] ได้สรุปสมการที่ได้จากการทดสอบบนชุดทดสอบซึ่งออกแบบเพื่อหาค่าความดันลดในรีเจนเนอเรเตอร์โดยมีมอเตอร์ประกอบเป็นชุดขับให้ลูกสูบเคลื่อนที่ไปกลับผลักดันก๊าซผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ และทำการคำนวณหาแฟคเตอร์ความเสียดทาน โดยผู้วิจัยคณะต่าง ๆ ได้ทดสอบโดยใช้ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางหลอดและค่าความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ต่าง ๆ กัน สรุปสมการที่ได้โดย Gedeon และ Wood [14] แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

สรุปสมการที่ใช้คำนวณความดันลด

ตัวแปร	สมการหาแฟคเตอร์สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
ความพรุน	$\varepsilon = 1 - \frac{V_{mat}}{V_{tot}} \quad (4.4)$
ความเร็วในการไหล	$u = \frac{u_0}{\varepsilon} \quad (4.5)$
เลขเรย์โนลด์	$Re = \frac{d\varepsilon u}{(1-\varepsilon)v} \quad (4.6)$
สมการความดันลด	$\Delta p = C_f \frac{L(1-\varepsilon)\rho}{d\varepsilon^2} u^2 \quad (4.7)$
สมการสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	$C_f = \frac{129}{Re} + \frac{2.91}{Re^{0.103}} \quad (4.8)$

โดยที่ Re คือ เลขเรโนลด์ ρ คือความหนาแน่นของสารทำงาน Δp คือความดันลด L คือความยาวของรีเจเนอเรเตอร์ ϵ คือ ความพรุน d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอด u คือ ความเร็วการไหลของสารทำงานในรีเจเนอเรเตอร์ u_0 คือ ความเร็วการไหลเมื่อไม่มีวัสดุพรุน V_{mat} คือ ปริมาตรของเนื้อวัสดุในรีเจเนอเรเตอร์ V_{total} คือ ปริมาตรทั้งหมดของรีเจเนอเรเตอร์ สมการค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แสดงในตารางระบุว่าจะใช้ได้กับเลขเรโนลด์ ในช่วงระหว่าง 1.04 -3400



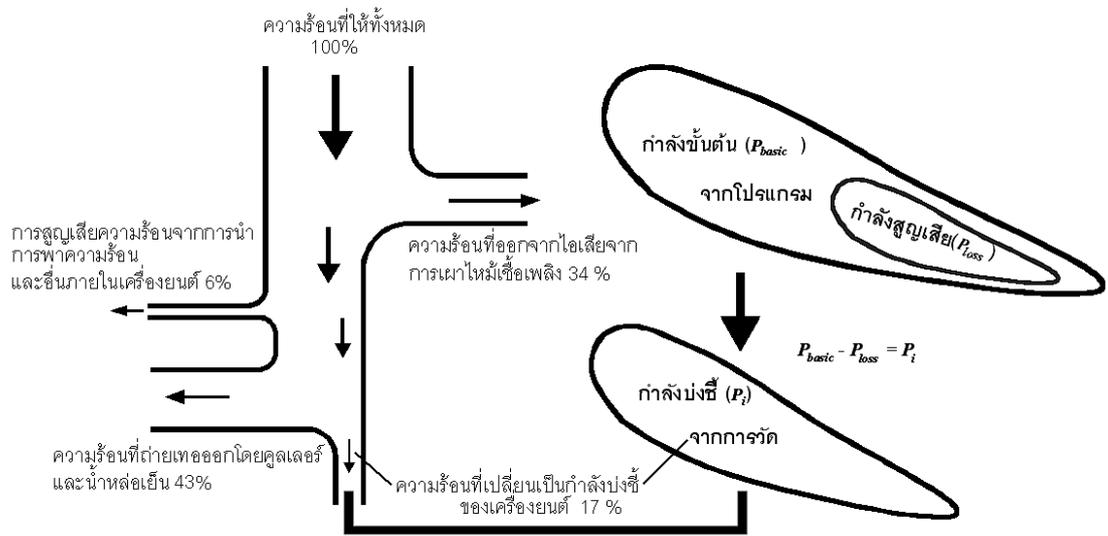
โดยที่ d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลอด
 w คือ ขนาดของช่องว่างตะแกรง
 s คือ ระยะระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอด

ภาพที่ 4.1

ขนาดมิติของตะแกรงหลอดรีเจเนอเรเตอร์ ที่ใช้ในการคำนวณ

4.3 การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรีเจเนอเรเตอร์

จากผลการคำนวณด้วยสมการในหัวข้อ 4.2 ได้นำมาปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้น และให้ลักษณะของกราฟที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบ วิธีการคำนวณโดยโปรแกรมของ Urieli [1] จะคำนวณกำลังขั้นต้นโดยไม่คิดการสูญเสีย และลบด้วยกำลังที่สูญเสียจากความดันลดในส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนจะได้เป็นกำลังบ่งชี้ ซึ่งกำลังบ่งชี้จะสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการวัดตามที่กล่าวถึงในหัวข้อ 3.2.2 ความสัมพันธ์ของทั้งสาม แสดงด้วยแผนภาพตามภาพที่ 4.2 กำลังบ่งชี้ที่ได้จากการวัดทางด้านซ้ายของแผนภาพ จะมีขนาดเท่ากับกำลังขั้นต้นที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ลบด้วยเป็นกำลังที่สูญเสียทางด้านขวา จากความสัมพันธ์นี้เมื่อทราบกำลังบ่งชี้จากการวัดก็จะหากำลังที่สูญเสียได้



ภาพที่ 4.2

ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังปั้งซี และกำลังขั้นต้น และกำลังที่สูญเสีย

$$P_{basic} - P_i = P_{loss} \quad (4.9)$$

$$P_{loss} / f = \Delta p \times \Delta V_e \quad (4.10)$$

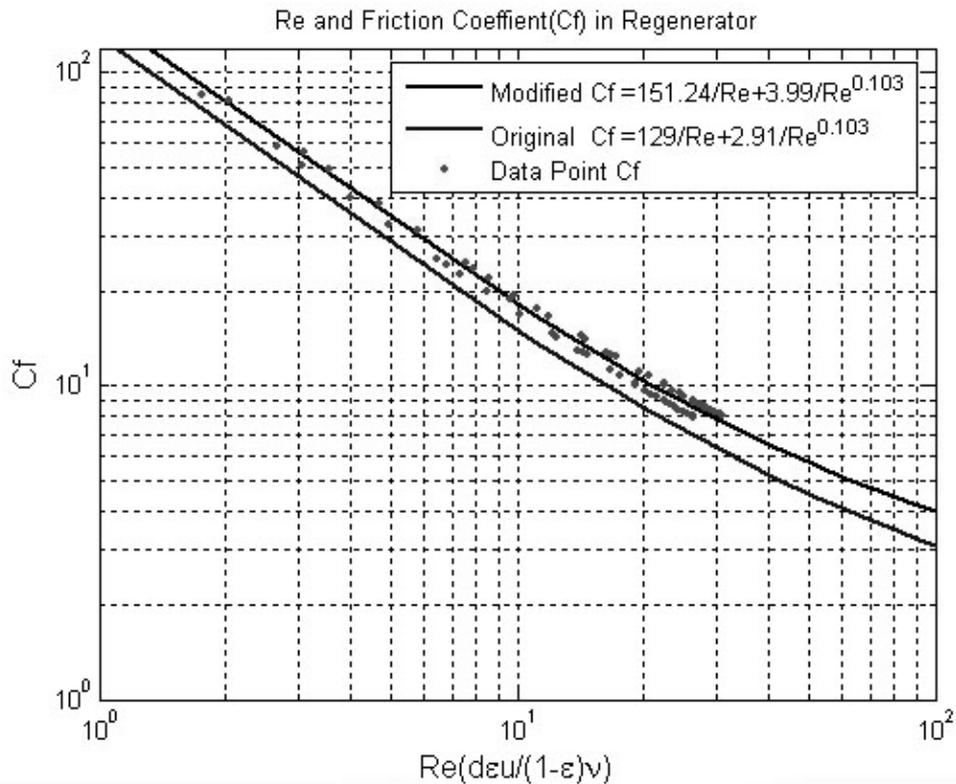
เมื่อ P_{basic} คือ กำลังขั้นต้น (จากโปรแกรม) P_{loss} คือ กำลังที่สูญเสีย P_i คือ กำลังปั้งซี Δp คือ ความดันลด และ ΔV_e คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรขยาย

จากสมการ 4.9 เมื่อคำนวณกำลังขั้นต้นจากโปรแกรมและทราบกำลังปั้งซีจากผลการทดสอบ จะหาค่ากำลังที่สูญเสียได้ และหาค่าความดันลดได้จากสมการ 4.10

และจากความดันลดสามารถนำมาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน C_f ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเลขเรย์โนลด์์ตามสมการ $C_f = \frac{a}{Re} + \frac{b}{Re^{0.103}}$ โดยคำนวณหาค่าคงที่ a และ b ด้วยวิธีความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (least square error method) ซึ่งได้ผลลัพธ์ค่าคงที่ a และ b คือ 151.2 และ 3.994 ตามลำดับ จะได้สมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

$$C_f = \frac{151.2}{Re} + \frac{3.99}{Re^{0.103}} \quad (4.11)$$

สมการ 4.8 ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเดิม และสมการ 4.11 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ค่าคงที่ปรับปรุงจากการคำนวณ นำมาพลอตกราฟจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์์และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรีเจนเนอเรเตอร์ ของค่าเดิมและค่าที่ปรับปรุงแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.3

กราฟเปรียบเทียบผลค่าจากสมการที่ทำการปรับแก้และค่าเดิม

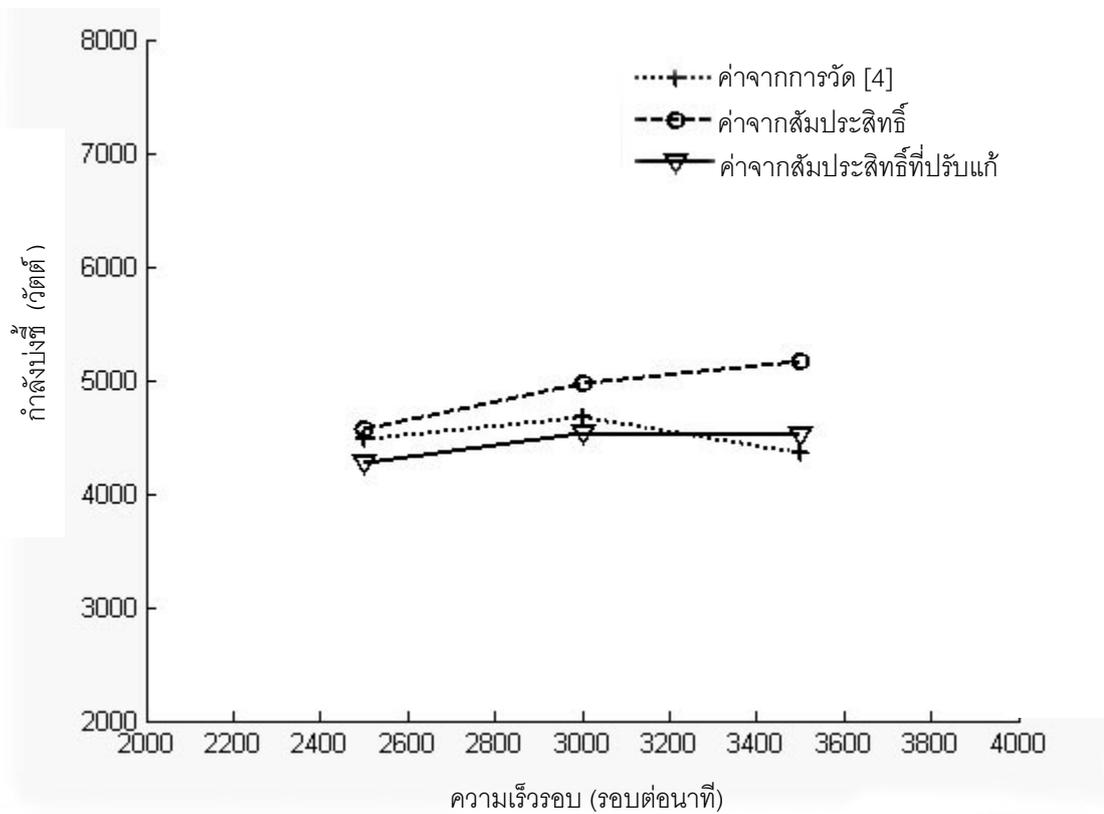
4.4. ผลการคำนวณจากโปรแกรมที่ทำการปรับปรุง

ผลลัพธ์จากการคำนวณกำลังปั๊มซึ่งหลังจากการปรับปรุงวิธีการตามหัวข้อที่ 4 เมื่อเทียบกับผลการทดสอบของเครื่องยนต์ GPU-3 และเครื่องยนต์ Allison PD46 เป็นดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลการคำนวณกำลังปั๊มที่เครื่องยนต์ GPU-3

จากการปรับค่าอุณหภูมิของคูลเลอร์และคำนวณความดันลดจากสมการ 4.4 และ 4.5 ได้ผลการคำนวณกำลังปั๊มของเครื่องยนต์ GPU-3 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าการคำนวณกำลังปั๊มซึ่งใช้การสมการจาก 4.4 และ 4.5 จะได้ผลของกำลังปั๊มที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วรอบ แต่กราฟจากผลการทดสอบจะมีจุดสูงสุดที่ 3,000 รอบจากนั้นกำลังจะลดลง ซึ่งจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการคำนวณกำลังที่ได้จากค่าคงที่ที่ได้จากในหัวข้อ 4.3 จากการปรับคำนวณความดันลดจากสมการ 4.6 ที่ได้จากการคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานย้อนกลับได้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ $\pm 5\%$

กราฟแสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังป้อนของเครื่องยนต์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเดิมและค่าที่ปรับแก้แสดงตามภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4

กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังป้อนของเครื่องยนต์

ตารางที่ 4.2

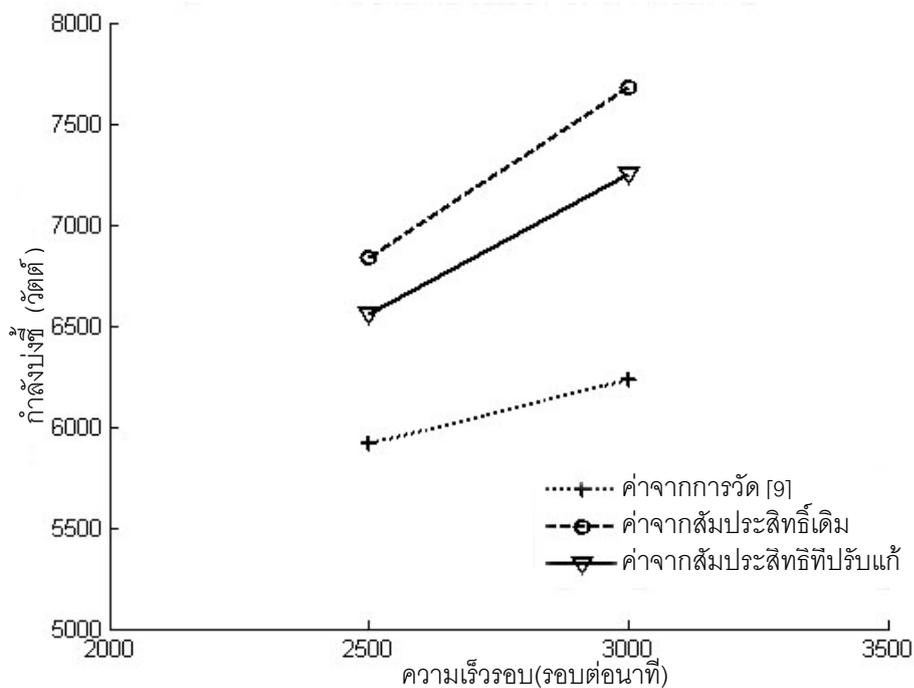
ผลการคำนวณกำลังป้อนเครื่องยนต์ GPU-3

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	กำลังป้อนจากการทดสอบ(วัตต์)	กำลังป้อนจากการสมการ 4.4(วัตต์)	กำลังป้อนจากการปรับแก้(วัตต์)
2,500	4,490	4,562 (2%)	4,269.3 (5%)
3,000	4,681	4,982 (6%)	4,530.9 (3%)
3,500	4,352	5,168 (19%)	4,514.5 (4%)

4.4.2 ผลการคำนวณกำลังป้อนเครื่องยนต์ Allison PD46

จากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้ในหัวข้อ 4.3 และทดสอบใช้คำนวณหา กำลังป้อนใน 4.4.1 พบว่าผลการคำนวณใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบจึงนำค่านี้มาใช้ในการ คำนวณหา กำลังป้อนของเครื่องยนต์ Allison PD46 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์รูปแบบเดียวกับเครื่องยนต์ GPU-3 แต่มีปริมาตรและตัวแปรในการทำงานต่างกัน ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณกำลังป้อน เครื่องยนต์ Allison PD46

จากการนำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรีเจนเนอเรเตอร์ที่ปรับปรุงมาคำนวณ กับเครื่องยนต์ Allison PD46 ที่ความเร็วรอบ 2,500 และ 3,500 ผลการคำนวณกำลังป้อน มีค่า ความผิดพลาด สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 16% ดังแสดงในตารางที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบผลการ ทดสอบและผลการคำนวณแสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5

กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังป้อนของเครื่องยนต์ Allison PD46

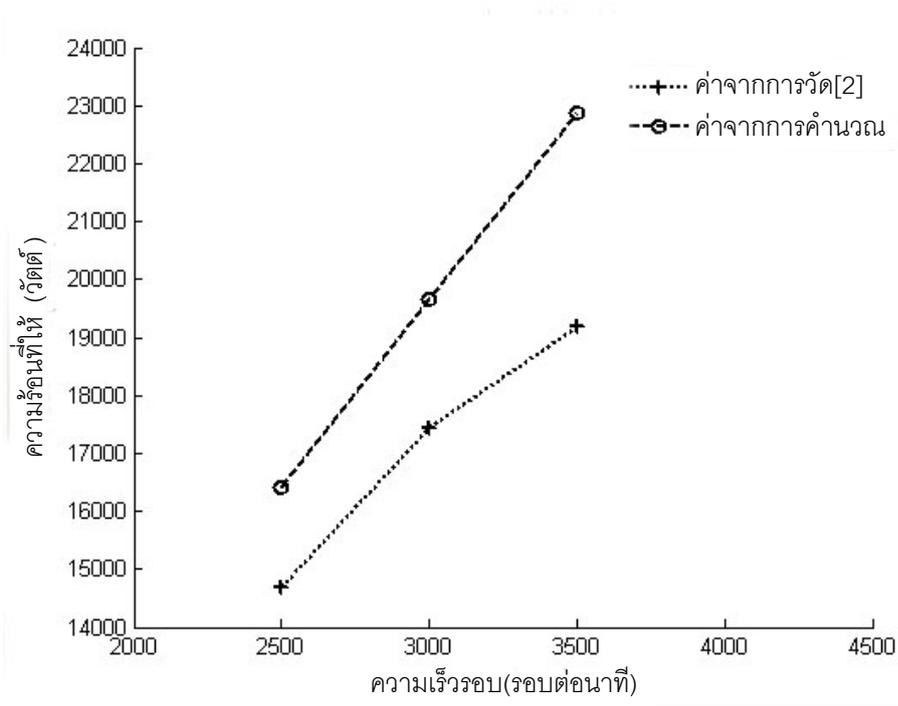
ตารางที่ 4.3

ผลการคำนวณกำลังบังชี้เครื่องยนต์ Allison PD46

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	กำลังบังชี้จากการ ทดสอบ(วัตต์)	กำลังบังชี้จากการ สมการ 4.4(วัตต์)	กำลังบังชี้จากการ ปรับแก้(วัตต์)
2,500	5,920	6,837(15.5%)	6,558 (10.7%)
3,000	6,230	7,677 (23.3%)	7,252(16.4%)

4.4.3 ผลการคำนวณความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์

ผลการคำนวณความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ ไม่ขึ้นอยู่กับสมการความดันลด การคำนวณโดยโปรแกรมที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับเครื่องยนต์ GPU-3 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณแสดงตามภาพที่ 4.6 ค่าที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าจากการวัดที่ความเร็วรอบต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.3 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 20%



ภาพที่ 4.6

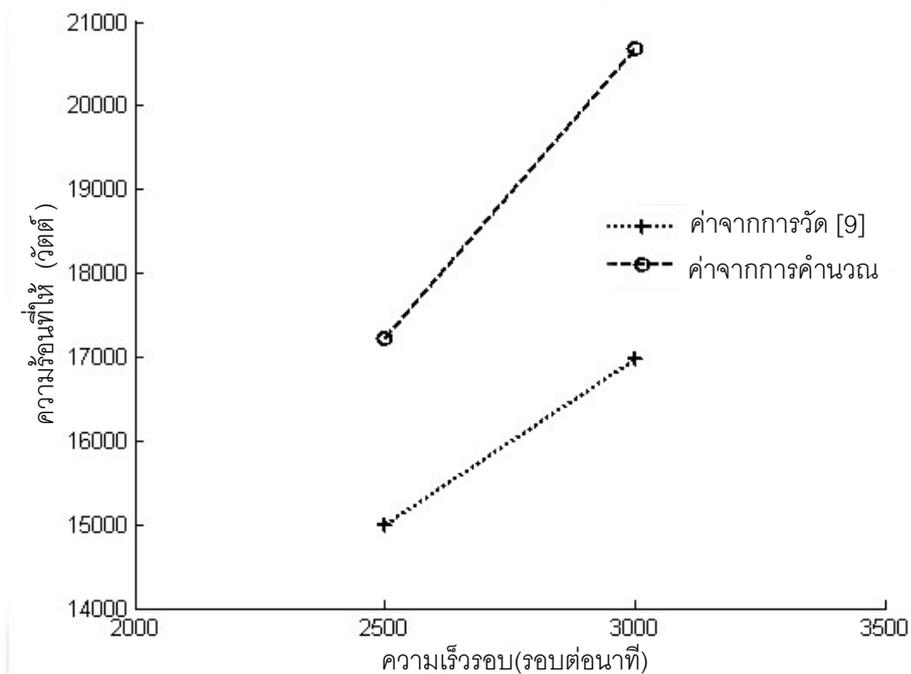
กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ GPU-3

ตารางที่ 4.4

ผลการคำนวณความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ GPU-3

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความร้อนที่ให้แก่ การทดสอบ(วัตต์)	ความร้อนที่ให้แก่ การคำนวณ(วัตต์)
2,500	14,690	16,400(11.6%)
3,000	17,450	19,647 (12.6%)
3,500	19,180	22,861 (19.2%)

ผลการคำนวณความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ Allison PD46 แสดงด้วยกราฟตามภาพที่ 4.5 และค่าที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.5 มีค่าความผิดพลาดสูงสุด อยู่ที่ประมาณ 22 %



ภาพที่ 4.7

กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ Allison PD46

ตารางที่ 4.5

ผลการคำนวณความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ Allison PD46

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความร้อนที่ให้จาก การทดสอบ(วัตต์)	ความร้อนที่ให้จาก การคำนวณ(วัตต์)
2,500	15,000	17,218 (14.8%)
3,000	16,970	20,685 (21.8%)

4.5 สรุปผลการปรับปรุงโปรแกรม

จากการศึกษาการคำนวณและปรับปรุงการคำนวณของโปรแกรมพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อกำลังของเครื่องยนต์นอกจากอุณหภูมิด้านร้อน ความดันและความเร็วรอบ แล้วได้ข้อสรุปคือ

4.5.1 ผลของอุณหภูมิด้านเย็นที่มีผลสำคัญในการคำนวณกำลังเบื้องต้นของเครื่องยนต์ซึ่งในการคำนวณเพื่อออกแบบเครื่องยนต์จริงต้องคำนึงถึงการออกแบบระบบหล่อเย็นที่เหมาะสม

4.5.2 สมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการไหลในรีเจนเนอเรเตอร์ และสมการความดันลมมีผลอย่างมากต่อความแม่นยำในการคำนวณหาค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ ซึ่งจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้ก่อนการปรับปรุงโปรแกรมในหัวข้อ 3.3 และผลเมื่อปรับปรุงแล้วในหัวข้อ 4.4.1

4.5.3 สมการที่ 4.4 จากเอกสาร [14] ที่ได้จากการทดสอบระบุว่าใช้ได้ในช่วงเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 1.04-3400 แม้ว่าในสมการที่ 4.8 ที่ทำการปรับปรุงนี้ไม่ได้นำมาจากการทดสอบโดยตรง แต่สำหรับเครื่องยนต์ GPU-3 และ Allison PD46 ค่าของเลขเรย์โนลด์ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่า 200 สมการ 4.8 นี้จึงอาจใช้ได้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์แบบเดี่ยวและทำงานในช่วงความดันเดียวกัน คือในช่วงความดัน 5-10 เมกะปาสคาล

4.5.4 ผลที่ได้จากโปรแกรมที่ปรับปรุงนี้ ผลการคำนวณกำลังบ่งชี้และความร้อนที่ให้กับเครื่องยนต์นี้มีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดในเกณฑ์การยอมรับผลของโปรแกรม และสามารถนำไปใช้กับการคำนวณประเมินกำลังเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีลักษณะเดียวกันนี้ในการคำนวณเพื่อออกแบบได้