

### บทที่ 3

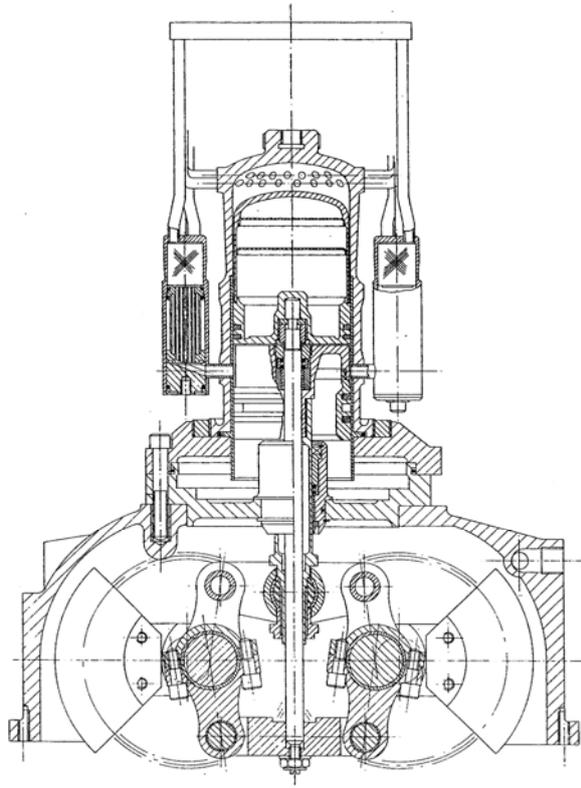
#### เครื่องยนต์ที่นำมาศึกษาและโปรแกรมการคำนวณ

การศึกษารอบแบบเครื่องยนต์สเตอลิง สิ่งที่ต้องการศึกษาคือการคำนวณหา กำลังและประสิทธิภาพที่จะได้จากเครื่องยนต์ โดยการใช้ข้อมูลจากเครื่องยนต์ที่มีการสร้างขึ้น และมีการทดสอบจริง ซึ่งจะเป็นแนวทางสำหรับการคำนวณและออกแบบหรือปรับปรุงเครื่องยนต์ ได้ต่อไป ในการศึกษาจะทำโดยการใช้ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ซึ่งมีรายละเอียดของขนาด ส่วนต่าง ๆ ภายในเครื่องยนต์ ชนิดของส่วนประกอบและวัสดุ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับคำนวณ

#### 3.1 เครื่องยนต์ที่นำมาศึกษา

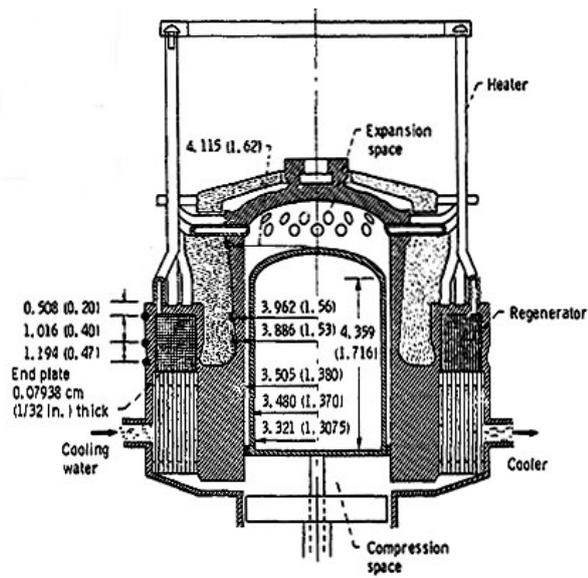
เครื่องยนต์ที่นำมาใช้ศึกษาคือ เครื่องยนต์ GPU-3 ของบริษัท เจเนอรัลมอเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องยนต์แบบเบต้ากระบอกสูบเดี่ยว ให้กำลังสุทธิสูงสุด 7.5 กิโลวัตต์ ใช้กลไกขับเคลื่อน แบบรอมบิก ความดันตามทีออกแบบ 6.9 เมกะปาสคาล ความเร็วรอบทีออกแบบ 3,000 รอบต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ 69.9 มิลลิเมตร ระยะชัก 30.7 มิลลิเมตร ปริมาตร กระบอกสูบ 118 ซีซี เนื่องจากเป็นเครื่องยนต์แบบเบต้า กระบอกสูบเดี่ยวตรงกับรูปแบบทีต้องการ ศึกษา ข้อมูลจำเพาะ ปริมาตร ขนาดของส่วนต่าง ๆ ทีต้องใช้ในการคำนวณได้แสดงไว้ครบถ้วน และมีผลการทดสอบทีสามารถนำมาเปรียบเทียบ เพื่อปรับปรุงโปรแกรมการคำนวณได้ นอกจากนี้ ในเอกสาร[4] มีรายละเอียดชิ้นส่วนและส่วนประกอบของเครื่องยนต์ ซึ่งนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อ ออกแบบได้

เครื่องยนต์อีกเครื่องทีนำมาตรวจสอบผลการคำนวณจากโปรแกรมทีปรับปรุง คือ เครื่องยนต์ Allison PD46 ของบริษัท เจเนอรัลมอเตอร์ เช่นเดียวกัน เป็นเครื่องยนต์ในรูปแบบ เดียวกันและใช้ชิ้นส่วนหลักเหมือนกับเครื่องยนต์ GPU-3 ต่างกันในส่วนของฮีตเตอร์และออกแบบ เพื่อให้ใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ภาพที 3.1 แสดงแบบของเครื่องยนต์ GPU-3 และ ภาพที 3.2 แสดงรายละเอียดชิ้นส่วนหลักและขนาด



ภาพที่ 3.1

ภาพแสดงเครื่องยนต์สเตอร์ลิง GPU-3 [10]



ภาพที่ 3.2

ภาพแสดงขนาดมิติของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ GPU-3 [2]

### 3.1.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์

ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ GPU-3 แสดงในตารางที่ 3.1 และข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ Allison PD46 แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1

ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ GPU-3 [10]

รูปแบบของเครื่องยนต์	แบบเบต้า กระบอบอกสูบสูบเดียว
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ X ระยะชัก	69.9 X 31.2 มม
สารทำงาน	ฮีเลียม
ความดันสารทำงาน	5.52 เมกะปาสคาล
ความเร็วรอบต่อนาที	1,500-3,500
อุณหภูมิด้านฮีตเตอร์	922 เคลวิน
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	288 เคลวิน
อัตราไหลของน้ำหล่อเย็น	0.03 กก.ต่อนาที
ปริมาตรกวาด,ปริมาตรนิ่งด้านขยาย	124.9,12.28 ซีซี
ปริมาตรกวาด,ปริมาตรนิ่งด้านอัด	211.9,11.51 ซีซี
$\phi$ ในที่ฮีตเตอร์ X ความยาว	3.02 X 245.3 มม.
$\phi$ ในที่คูลเลอร์ X ความยาว	1.08 X 46 มม.
$\phi$ รีเจนเนอเรเตอร์ X ความยาว	22.6 X 22.
ความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ ขนาดลวด	0.697,0.04 มม.
จำนวนฮีตเตอร์ คูลเลอร์ รีเจนเนอเรเตอร์	40, 312, 8

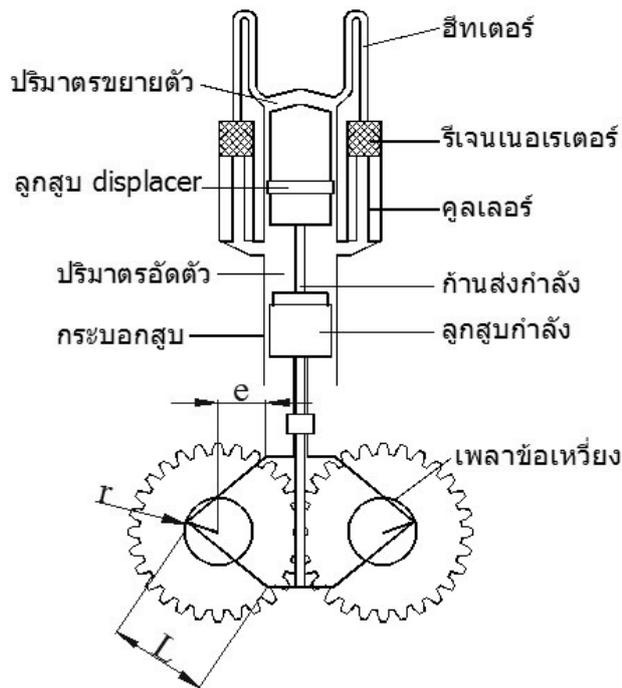
### ตารางที่ 3.2

ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ Allison PD46 [9,10]

รูปแบบของเครื่องยนต์	แบบเบต้า กระบอกสูบเดี่ยว
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ × ระยะชัก	60.325 × 28.4 มม
สารทำงาน	ฮีเลียม
ความดันสารทำงาน	10 เมกะปาสคาล
ความเร็วรอบต่อนาที	2,500-3,000
อุณหภูมิด้านฮีตเตอร์	1,024 เคลวิน
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	339 เคลวิน
อัตราไหลของน้ำหล่อเย็น	0.25 กก.ต่อนาที
ปริมาตรกวาด, ปริมาตรหนึ่งด้านขยาย	81.17, 13.49 ซีซี
ปริมาตรกวาด, ปริมาตรหนึ่งด้านอัด	81.17, 77.57 ซีซี
$\phi$ ใน ท่อฮีตเตอร์ × ความยาว	1.83 × 104 มม.
$\phi$ ใน ท่อคูลเลอร์ × ความยาว	1.016 × 66 มม.
$\phi$ รีเจนเนอเรเตอร์ × ความยาว	20.32 × 20.32
ความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์, ขนาดลวด	0.690, 0.04 มม.
จำนวนฮีตเตอร์ คูลเลอร์ รีเจนเนอเรเตอร์	96, 152, 8

#### 3.1.2 กลไกแบบรอมบิก

กลไกแบบรอมบิก (rhombic drive) ถูกนำมาใช้กับเครื่องยนต์สเตอจิงแบบเบต้า เพื่อเปลี่ยนการเคลื่อนที่ขึ้นลงของลูกสูบอัดและลูกสูบขยาย (displacer) ให้เป็นการหมุนของเพลลา มีข้อดีคือมีความสมดุลเท่ากันทั้งสองด้าน และเกิดแรงที่กระทำต่อผนังกระบอกสูบต่ำ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียจากความเสียดทาน และปัญหาสารทำงานรั่วไหลออกจากกระบอกสูบ กลไกแบบรอมบิกมีลักษณะดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3

ภาพแสดงกลไกแบบรอมบิก

ตัวแปรและสมการของกลไกแบบรอมบิก

$r$  = ระยะระหว่างจุดยึดกลไกและจุดหมุน

$e$  = ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางการหมุนและจุดยึดของ yoke

$L$  = ความยาวของก้านต่อ

ปริมาตรอัด

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

ปริมาตรขยาย

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

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

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

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

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

### 3.1.3 อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบต่อระยะชัก

อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบต่อระยะชัก ( $B/S$ ) เป็นตัวแปรหนึ่งที่น่าสนใจในการออกแบบเครื่องยนต์โดยทั่วไป โดยปกติจะมีค่ามากกว่า 1 หรือเรียกว่า Over Square [7] ซึ่งหากค่านี้น้อยกว่าหนึ่งจะทำให้ลูกสูบต้องเคลื่อนที่เป็นระยะที่มากขึ้นมีผลต่อการสึกหรอและความเสียหาย สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า ข้อมูลค่าอัตราส่วน  $B/S$  จากเครื่องยนต์ที่มีการสร้างขึ้นจริง มีค่าอยู่ระหว่าง 1.37 ถึง 3.6 แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3

ข้อมูลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้าที่มีการสร้างและใช้งาน [7,8,10,11,12]

เครื่องยนต์	ความดัน (MPa)	ความเร็ว รอบ	ปริมาตร (ซีซี)	กำลังที่ได้ (กิโลวัตต์)	Bore (มม)	ระยะชัก (มม)	ค่า B/S
V-160	12.5	1,500	160	30.4	68	44	1.545
P40/4-95	15	4,000	95	1.12	55	40	1.375
MP1002CA	1.5	1,500	59	0.250	55	27	2.037
PD46	10.2	3,000	81	5.0	60.3	28.4	2.123
GPU 3	6.9	3,600	120	7.9	69.9	31.2	2.240
Carlsen	7.8	1,020	551	95.0	114	54	2.111
30-15	10.5	1,500	365	22.35	88	60	1.467
10HP	10	3,000	979	7.45	63	31.4	2.006
ECOBOY	1	1,000	22.6	0.100	72	20	3.600

จากค่าอัตราส่วน  $B/S$  ของเครื่องยนต์สโตลิงแบบเบต้าที่แสดงในตารางจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.4-3.6 โดยค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.0 การเลือกใช้ค่า  $B/S$  ในการออกแบบควรจะอยู่ภายในช่วงนี้

### 3.2 ข้อมูลการทดสอบเครื่องยนต์

#### 3.2.1 ผลจากการทดสอบเครื่องยนต์

ข้อมูลการทดสอบเครื่องยนต์จะอ้างอิงจากเครื่องยนต์ 2 แบบ คือ GPU-3 และ Allison PD46 โดยผลการทดสอบเครื่องยนต์ GPU-3 [4] จะใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการปรับปรุงโปรแกรม เนื่องจากในเอกสารได้ระบุวิธีการทดสอบและวัดไว้อย่างครบถ้วน และข้อมูลจากการวัดของเครื่องยนต์ Allison PD46 [9] จะใช้ในการตรวจสอบการยอมรับผลของโปรแกรม

เครื่องยนต์ GPU-3 จากเอกสาร [4] ได้ทำการทดสอบจริง ที่อุณหภูมิ ความดัน และความเร็วรอบต่าง ๆ กัน เพื่อวัดค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้ ซึ่งไม่รวมผลของความเสียหายจากชิ้นส่วนเคลื่อนที่ และคำนวณความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์โดยการสมมูลความร้อน กำลังบ่งชี้ได้จากการวัดค่าโดยการวัดค่าความดันในกระบอกสูบซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งแสดงกราฟ P-V ออกมาที่หน้าจอแสดงผล ในส่วนเครื่องยนต์ Allison PD46 อ้างอิงจากเอกสาร [9] ซึ่งระบุเฉพาะผลที่ได้จากการทดสอบ ผลการทดสอบจากต้นฉบับและรายละเอียดเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ข. ค่าที่ได้จากการทดสอบสรุปในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4

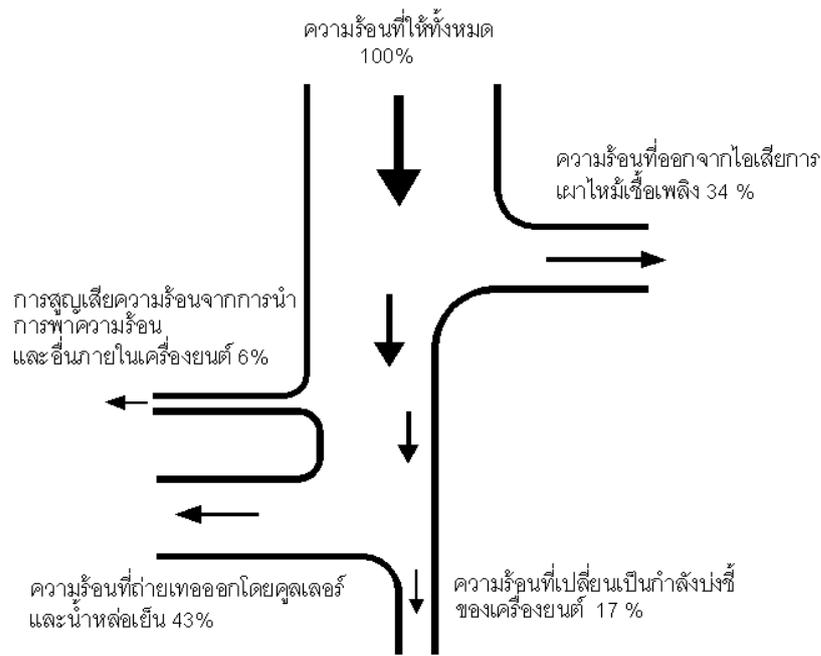
ค่าจากการทดสอบเครื่องยนต์ GPU-3 และ Allison PD46

	GPU-3			Allison PD46	
	2,500	3,000	3,500	2,500	3,000
ความเร็วรอบต่อนาที	2,500	3,000	3,500	2,500	3,000
ความดัน (MPa)	5.12	5.12	5.12	10	10
อุณหภูมิฮีทเตอร์(K)	922	922	922	933	933
อุณหภูมิคูเลเตอร์ (K)	288*	288*	288*	338	338
ความร้อนที่ให้ (วัตต์)	14,690	17,450	19,180	15,000	16,970
กำลังสุทธิ (วัตต์)	3,280	3,280	2,760	4,050	4,140
กำลังบ่งชี้ (วัตต์)	4,490	4,681	4,352	5,920	6,230

\* ในเครื่องยนต์ GPU-3 อุณหภูมิที่ระบุเป็นอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในคูเลเตอร์

### 3.2.2 สมดุลความร้อนในเครื่องยนต์ GPU-3

ข้อมูลการสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์ GPU-3 จากเอกสาร [4] เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงาน ความดัน 6.9 เมกะปาสคาล ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 922 เคลวิน นำมาสร้างเป็นแผนภาพสมดุลความร้อน ตามภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4

แผนภาพแสดงสมดุลความร้อนในเครื่องยนต์ GPU-3

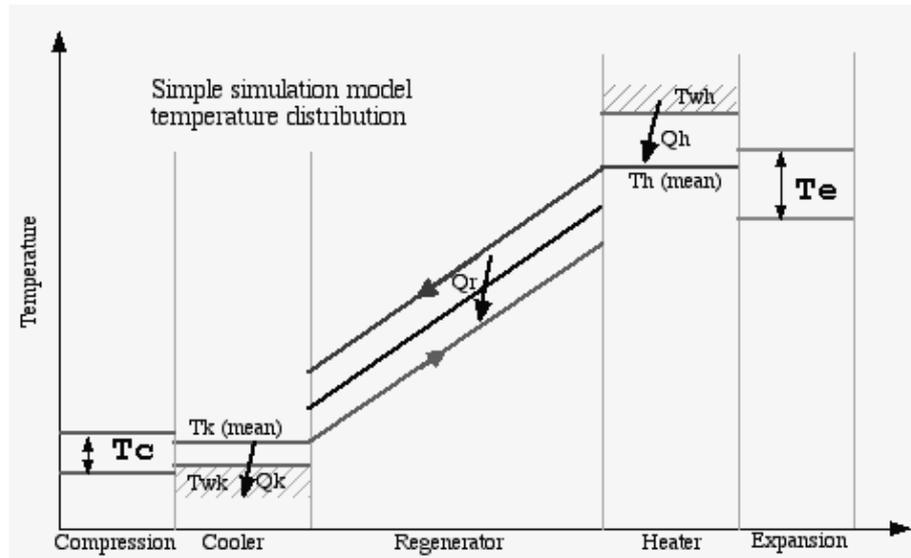
### 3.3 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ

ในการศึกษานี้ได้นำโปรแกรม Simple ซึ่งเขียนโดยใช้ MATLAB ของ Ureili [1] มาทำการปรับปรุง เพื่อคำนวณหากำลังบ่งชี้และความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ แบบจำลอง Simple จะรวมการพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและความดันที่สูญเสียไปจากการไหลภายในเครื่องยนต์

#### 3.3.1 แบบจำลอง Simple

การวิเคราะห์จากแบบจำลองอะเดียบาติก จะไม่พิจารณาผลของความสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ Ureili ได้เพิ่มการพิจารณาการลดลงของอุณหภูมิในรีเจนเนอเรเตอร์

ฮีตเตอร์ คูลเลอร์ และรีเจนเนอเรเตอร์ โดยใช้ชื่อแบบจำลองว่า Simple Analysis ซึ่งผลของประสิทธิภาพของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสามส่วนจะมีผลให้อุณหภูมิสารทำงานในส่วนฮีตเตอร์ และรีเจนเนอเรเตอร์ลดต่ำลงจากอุณหภูมิผนัง และส่วนคูลเลอร์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีผลให้กำลังบ่งชี้ และประสิทธิภาพที่ได้จากเครื่องยนต์ลดลง แบบจำลอง Simple แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5

ภาพแสดงแบบจำลอง Simple

จากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนภายในฮีตเตอร์และคูลเลอร์สมการทั่วไป ฟลักซ์ความร้อน คือ

$$\dot{Q} = hA_{wg} (T_w - T) \quad (3.12)$$

เมื่อ  $A_{wg}$  คือพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน  $h$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $T_w$  คืออุณหภูมิที่ผนังและ  $T$  คืออุณหภูมิของสารทำงาน สมการข้างต้นหารด้วยจำนวนรอบต่อวินาที ( $f$ ) จะได้สมการคือ

$$Q_k = h_k A_{wgk} (T_{wk} - T_k) / f \quad (3.13)$$

$$Q_h = h_h A_{wgh} (T_{wh} - T_h) / f \quad (3.14)$$

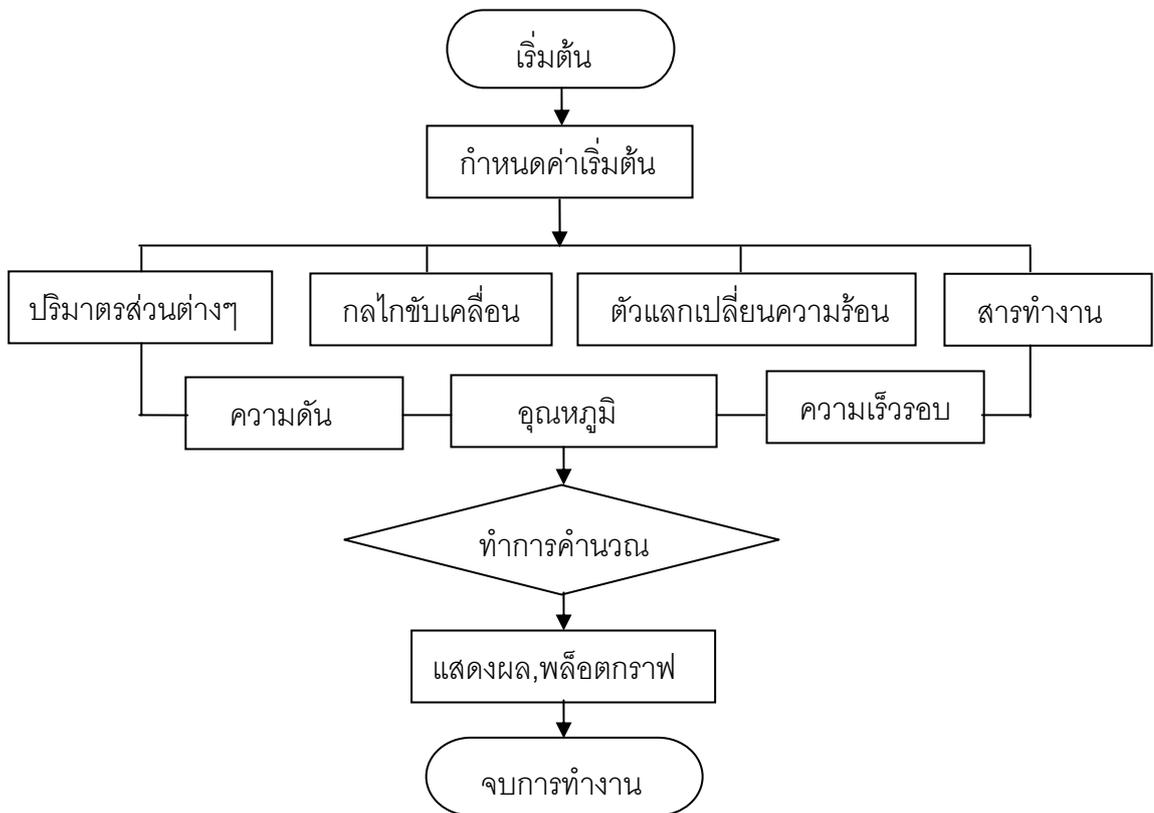
โดยที่ตัวห้อย  $h$  และ  $k$  หมายถึงด้านร้อนและเย็นตามลำดับ เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการสำหรับอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นคือ

$$T_h = T_{wh} - Q_h f / (h_h A_{wg_h}) \quad (3.15)$$

$$T_k = T_{wk} - Q_k f / (h_k A_{wg_k}) \quad (3.16)$$

### 3.3.2 โปรแกรม Simple

Ureili ได้เขียนโปรแกรมสำหรับคำนวณกำลังปั้งซี่และความร้อนที่ให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับการวิเคราะห์แบบ Simple ซึ่งดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ [3] ซึ่งจะใช้โปรแกรมนี้เป็นจุดเริ่มต้นการศึกษาและทำการปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลการคำนวณตามเกณฑ์การยอมรับผลที่ได้กำหนดไว้ ผังลำดับการคำนวณแสดงตามภาพที่ 3.6



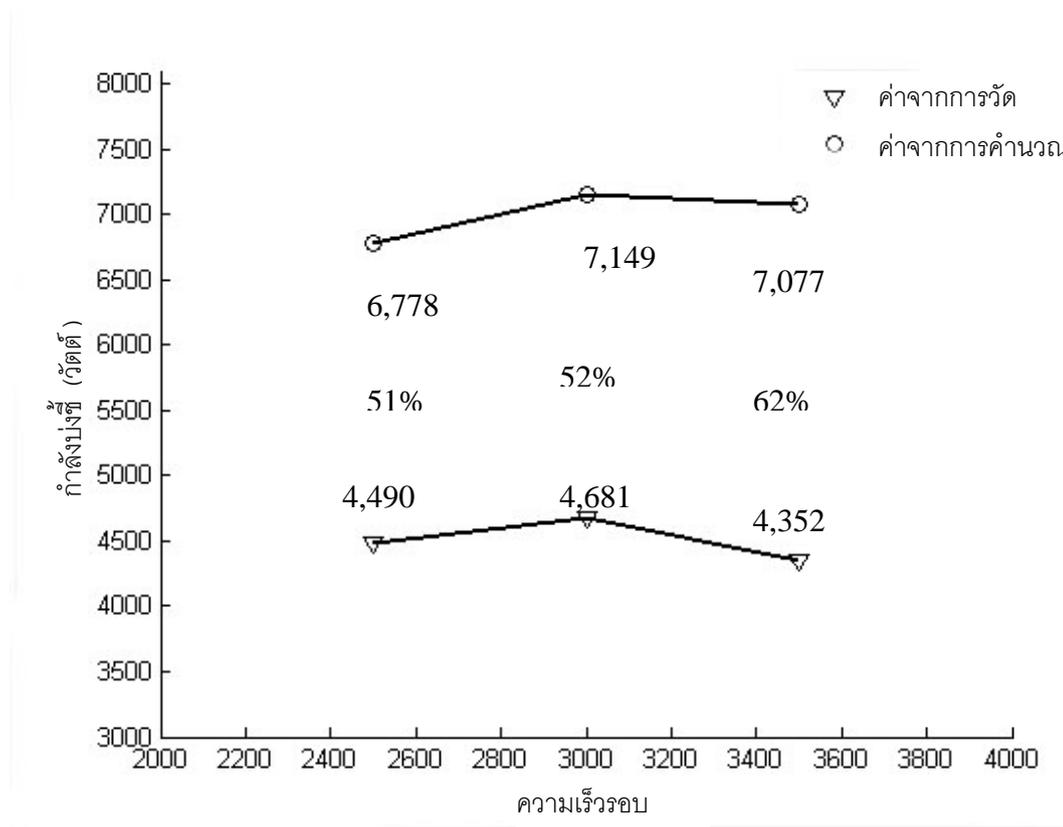
ภาพที่ 3.6

ภาพแสดงผังลำดับการคำนวณของโปรแกรม

### 3.3 การสอบทวนผลการคำนวณกับผลการทดสอบ

จากโปรแกรม Simple ของ Ureili ได้นำมาทำการปรับการคำนวณการเปลี่ยนแปลง

ปริมาตรให้ใช้ได้กับเครื่องยนต์สต่อถึงที่ใช้กลไกแบบรอมบิก โดยใช้สมการในหัวข้อ 3.1.2 ผลจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเครื่องยนต์ GPU-3 ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.2.1 ผลที่ได้แสดงด้วยกราฟในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7

กราฟแสดงผลการคำนวณกำลังปั้งซีของโปรแกรม Simple

จากค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมก่อนการปรับปรุงนี้แสดงให้เห็นว่าการคำนวณกำลังปั้งซีที่ได้ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่มากกว่า 50% ซึ่งจะได้ทำการพิจารณาเพื่อปรับปรุงโปรแกรมการคำนวณให้มีความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ก่อนนำไปใช้ออกแบบเครื่องยนต์ต่อไป