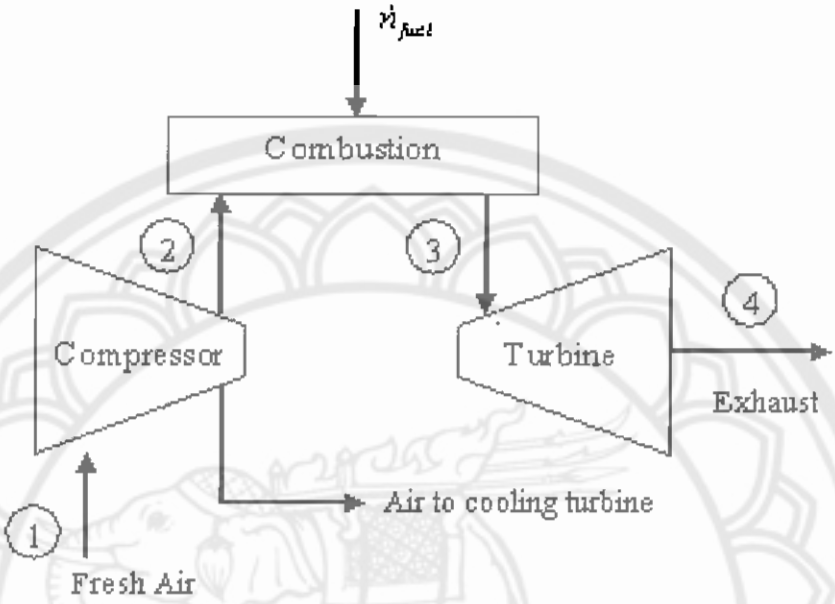
บทที่ 3
วิธีการดำเนินโครงงาน

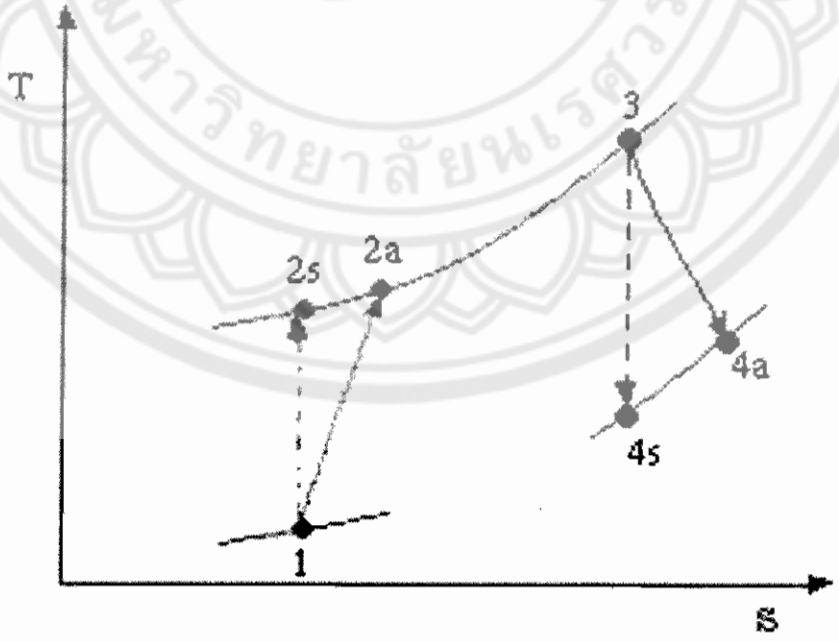
การดำเนินโครงงานจะเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas Turbine), ก๊าซผสมอุดมคติ (Ideal gas mixture), อุณหพลศาสตร์ของของผสมจริง (Gas-vapor mixture) และ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Chemical reaction) ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เมื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ แล้ว ขั้นตอนต่อไปแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ โดยการหาค่าประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ (Compressor), ประสิทธิภาพของกังหันก๊าซ (Turbine), ประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber), และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Thermal Efficiency of Gas Turbine) โดยใช้ข้อมูลเก่าที่โรงไฟฟ้าเก็บไว้มาทำการคำนวณ
2. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิทางออกของคอมเพรสเซอร์ (T_2), อุณหภูมิทางออกของห้องเผาไหม้ (T_3), อุณหภูมิทางออกของกังหันก๊าซ (T_4) และ กำลังที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของค่าที่คำนวณได้กับค่าจริง
3. จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ได้ ทำการเปลี่ยนค่าสภาวะขาเข้าที่จุด (1) โดยใช้ค่าที่เครื่องยนต์กังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าไม่เคยทำการปฏิบัติงาน (Operate) มาก่อน แล้วใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวัฏจักร จะทำให้ทราบถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของวัฏจักร โดยกำหนดตัวแปรที่สามารถเปลี่ยนค่าได้ดังนี้
   - อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ทางเข้าคอมเพรสเซอร์ (T_1)
   - **ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ทางเข้าคอมเพรสเซอร์ (%RH_1)**
   - **อัตราส่วนเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ทางทฤษฎีต่อเชื้อเพลิงส่วนที่เผาไหม้จริง (Equivalent ratio)**

3.1 ขอบเขตการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 3.1 แสดงวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ



รูปที่ 3.2 แสดง Ts-Diagram ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

สมมติฐานในการคำนวณ

- ก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas)
- ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่มีค่าคงที่ (Constant Pressure Specific Heat)
- ความดันคงที่ (Constant Pressure) ในห้องเผาไหม้
- วัฏจักรเป็นไปตาม T-s Diagram ข้างต้น
- การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์น้อยมาก
- อากาศจากคอมเพรสเซอร์ถูกนำไประบายความร้อนที่กังหันก๊าซ (Cooling turbine) 15%
- การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) เป็นการเผาไหม้สมบูรณ์
- ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณเป็นข้อมูลปี 2548 ระหว่างวันที่ 4 เดือนกรกฎาคม ถึง 26 เดือนธันวาคม พ.ศ.2548
- ใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลปี 2548 ระหว่างวันที่ 4 เดือนกรกฎาคม ถึง 26 เดือนธันวาคม ในการคำนวณในบทนี้

3.1.1 ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ $(\eta_{comp.})$

จากข้อมูลการการปฏิบัติงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าสามารถทราบค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$T_1 = 300.5K$$
$$P_1 = 85.77kPa$$
$$\%RH_1 = 61.45$$
$$T_2 = 663.9K$$
$$P_2 = 1409kPa$$

ดังนั้นสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ได้ดังนี้

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ

$$P_{sat(T)} = (T-273.15)^6 \times 6.352\times10^{-12} + (T-273.15)^5 \times 1.702\times10^{-9} + (T-273.15)^4 \times 3.377\times10^{-7} + (T-273.15)^3 \times 2.527\times10^{-5} + (T-273.15)^2 \times 1.449\times10^{-3} + (T-273.15)\times 0.4430 + 0.6109 \quad (3.1)$$

$$P_{vapor} = \left(\frac{\%RH}{100}\right) P_{sat(T)} \tag{3.2}$$

$$\omega = 0.622\left(\frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}}\right) \tag{3.3}$$

จะได้

$$P_{sat(T),1} = 3.68kPa$$

$$P_{vapor,1} = 2.22kPa$$

$$\omega_1 = 0.0165$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (2.25), (2.26), (2.28) และแทนค่า $\overline{R} = 8.314$ kJ/kmol-K จะได้

$$k_{wet_air,1} = 1.383$$

ดังนั้น

$$T_{2s} = T_1\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k_{wet_air,1}-1}{k_{wet_air,1}}} = 300.4668\left(\frac{1409}{85.77}\right)^{\frac{1.382-1}{1.382}} = 651.7K$$

เพราะฉะนั้น

$$\eta_{comp.} = \frac{T_1 - T_{2s}}{T_1 - T_{2s}} = \frac{300.5 - 651.7}{300.5 - 663.9} = 0.9662$$

3.1.2 ประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้($\eta_{comb.}$)

จากข้อมูลการการปฏิบัติงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าสามารถทราบค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\dot{m}_1 = 587.2kg/s$$

$$\dot{m}_2 = 587.2 \times 0.85 = 499.1kg/s$$

$$\dot{m}_{fuel} = 17.16kg/s$$

$$T_3 = 1588K$$

และเนื่องจากสมมติฐานในการคำนวณให้ $P_3 = P_2 = 1409kPa$ อีกทั้งอากาศจากคอมเพรสเซอร์จะถูกนำไประบายความร้อนที่กังหันก๊าซประมาณ 10-15% ในการคำนวณนี้

กำหนดให้อากาศจากคอมเพรสเซอร์ไประบายความร้อนที่กังหันก๊าซ 15 % ดังนั้นสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ได้ดังนี้

แทนค่าที่ทราบในสมการ (2.40) และ (2.41) แล้วจะได้

$$\left(\overline{C}_p\right)_{wet_air,2} = 716.5kJ/(kg \cdot K)$$

$$\left(\overline{C}_P\right)_{exhaust,3} = 786.5kJ/(kg \cdot K)$$

จากนั้นแทนค่าในสมการ (2.36), (2.37), (2.38), และ (2.39) จะได้

$$\sum_P n_e(\Delta\overline{h})_e = 1014 \times 10^3 kJ/s$$

$$\sum_R n_i(\Delta\overline{h})_i = 262.1 \times 10^3 kJ/s$$

$$\sum_R n_i\left(\overline{h}_f^O\right)_i = -229.3 \times 10^3 kJ/s$$

$$\sum_P n_e\left(\overline{h}_f^O\right)_e = -1015 \times 10^3 kJ/s$$

เพราะฉะนั้น

$$\eta_{comb.} = \frac{\sum_P n_e(\Delta\overline{h})_e - \sum_R n_i(\Delta\overline{h})_i}{\sum_R n_i\left(\overline{h}_f^O\right)_i - \sum_P n_e\left(\overline{h}_f^O\right)_e} = \frac{1014 - 262.1}{-229.3 - (-1015)}$$

$$= 0.9724$$

3.1.3 ประสิทธิภาพของกังหันก๊าซ $(\eta_{turb.})$

จากข้อมูลการการปฏิบัติงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าสามารถทราบค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$T_4 = 899.4K$$

$$P_4 = 97.61kPa$$

ดังนั้นสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของกังหันก๊าซได้ดังนี้

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (2.47), (2.48), (2.49), (2.50) และ (2.51) จะได้

$$k_{exhaust,4} = 1.323$$

ดังนั้น

$$T_{4s} = T_3\left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k_{exhaust,4}-1}{k_{exhaust,4}}} = 1588\left(\frac{97.61}{1409}\right)^{\frac{1.323-1}{1.323}} = 828.1K$$

เพราะฉะนั้น

$$\eta_{turb.} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} = \frac{1588 - 899.4}{1588 - 828.1} = 0.9061$$

3.1.4 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $(\eta_{gen.})$

จากข้อมูลการการปฏิบัติงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าสามารถทราบงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนี้

$$\dot{W}_{gen.} = 236.6\times10^3 kJ/s$$

จากสมการ (2.21) และ (2.22) จะได้อัตราการไหลโดยโมลของอากาศผ่านเครื่องอัดอากาศและกังหันก๊าซ ดังนี้

$$\dot{n}_{wet_air,1} = 20.57 kmol/s$$
$$\dot{n}_{exhaust,3} = \dot{n}_{exhaust,4} = 19.18 kmol/s$$

และจากสมการ (2.30) และ (2.46) ได้งานที่ต้องป้อนให้กับเครื่องอัดอากาศ และงานที่ได้จากกังหันก๊าซ ดังนี้

$$\dot{W}_{comp.} = 223.9\times10^3 kJ/s$$
$$\dot{W}_{turb.} = 447.9\times10^3 kJ/s$$

เพราะฉะนั้น

$$\eta_{gen.} = \frac{\dot{W}_{gen}}{\dot{W}_{turb.} - \dot{W}_{comp.}} = \frac{236.6}{447.9 - 223.9} = 0.9199$$

3.1.5 ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ $(\eta_{GT.})$

จากสมการ (2.38) และ (2.39) สามารถหาเอนทัลปีของการรวมตัว (Enthalpy of Formation) ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ได้ดังนี้

$$\sum_R n_i\left(\bar{h}_f^0\right)_i - \sum_P n_e\left(\bar{h}_f^0\right) = 786183 kJ/s$$

กำหนดให้มวลโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงเท่ากับ 20.75 ดังนั้นอัตราการไหลโดยโมล ของเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้คือ

$$\dot{n}_{fuel} = 0.8448 kmol/s$$

เพราะฉะนั้น

$$\eta_{GT.} = \frac{\dot{W}_{gen}}{\dot{n}_{fuel} \times \left(\sum_R n_i\left(\bar{h}_f^0\right)_i - \sum_P n_e\left(\bar{h}_f^0\right)_e \right)} = \frac{236579}{0.8448(786183)} = 0.3194$$

3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

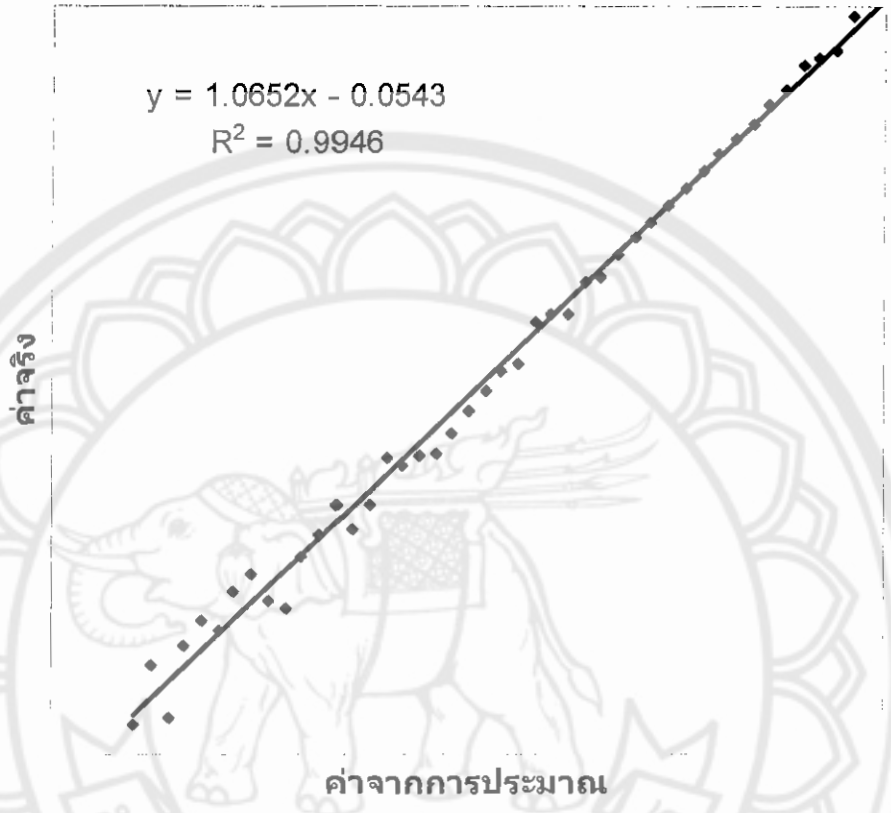
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอัดอากาศสามารถทำได้โดยการแทนค่าที่วัดได้จริงในแบบจำลองคำนวณค่า T_2 จากสมการ (2.25) แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่า T_2 ที่วัดได้จริงโดยการเขียนกราฟดังรูปที่ 3.3 จากนั้นหาสมการของเส้นแนวโน้มซึ่งกำหนดให้เป็นเส้นตรงและคำนวณสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ยกกำลังสอง (R^2)

ความถูกต้องของแบบจำลองสามารถตรวจสอบได้จากความชันของเส้นแนวโน้มและค่า R^2 ถ้าแบบจำลองประมาณค่าได้ใกล้เคียงความจริงมาก ความชันของเส้นแนวโน้มและค่า R^2 ต้องมีค่าใกล้เคียงกับ 1

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้และกังหันก๊าซสามารถทำได้เช่นเดียวกับเครื่องอัดอาอากาศ สำหรับห้องเผาไหม้จะทำการเปรียบเทียบเทียบอุณหภูมิ T_3 ส่วนกังหันก๊าซจะเปรียบเทียบอุณหภูมิ T_4

ความถูกต้องของแบบจำลองของแบบจำลองโดยรวมสามารถตรวจสอบได้โดยการเปรียบเทียบกำลังที่ผลิตได้จริงกับกำลังทีคำนวณได้จากจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

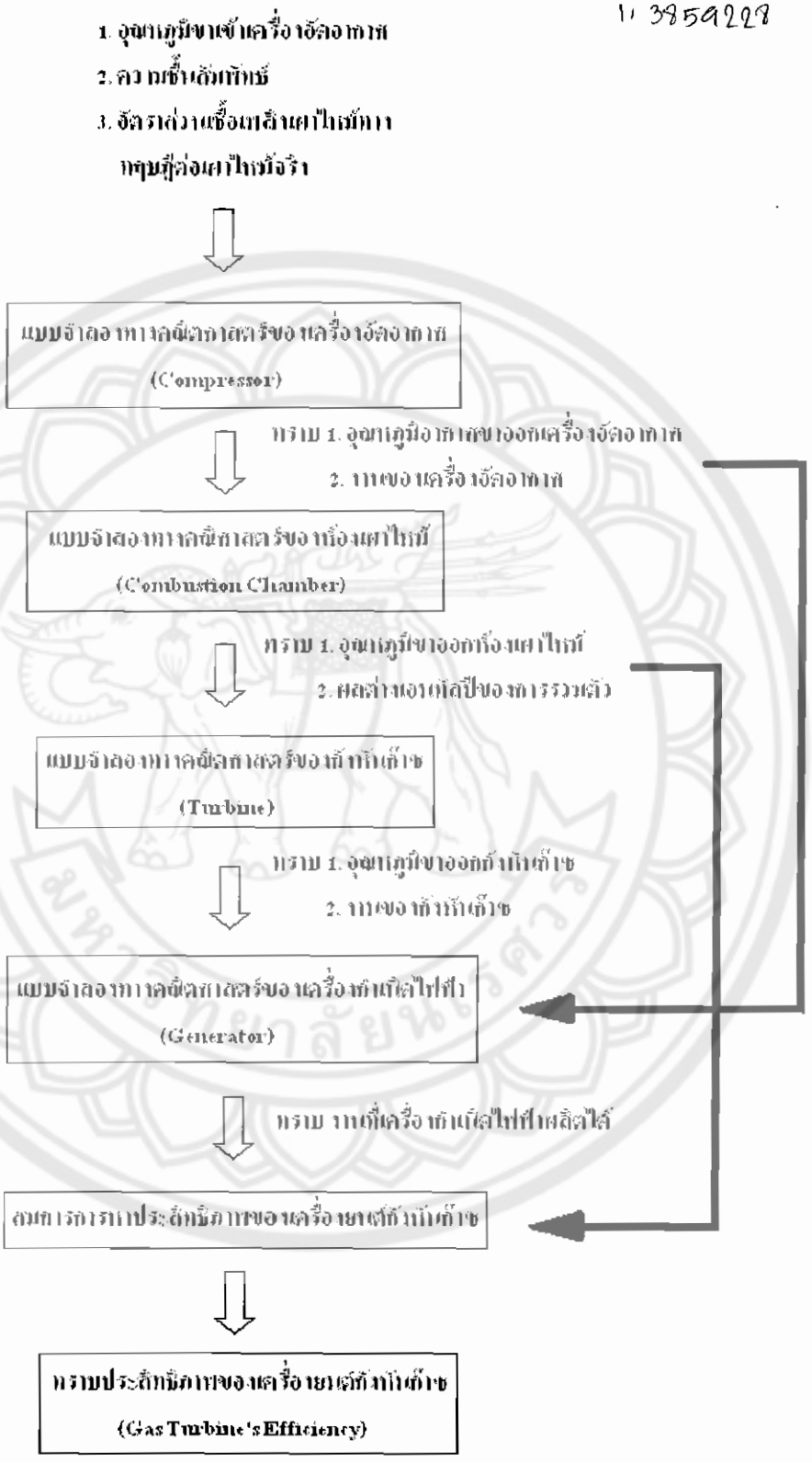


รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซโดยใช้จำลองทางคณิตศาสตร์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ในการประมาณค่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซได้ โดยมีลำดับขั้นตอนการคำนวณดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

ฝ
TL
709.5
.15
ม1528
2548
ใ 3859228
25
สำนักหอสมุด
17 มี.ค. 2551



รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการประมาณค่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ
โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอัดอากาศ

กำหนดค่าต่าง ๆ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$T_1(K)$

$\%RH_1$

ϕ

ส่วนค่าอื่นที่กำหนดให้เป็นค่าคงที่ โดยใช้ค่าเฉลี่ยจากข้อมูลการปฏิบัติงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าระหว่างวันที่ 4 เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2548 ถึง 26 เดือนธันวาคม พ.ศ. 2548 ซึ่งมีดังนี้ กำหนด $\dot{n}_{fuel} = 1\,kmol/s$, $T_{fuel} = T_1$

$P_1 = 85.77kPa$

$P_2 = 1410kPa$

$P_4 = 97.61kPa$

แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.21), (3.1), (3.2) และ (3.3) จะได้

$\dot{n}_{wet_air}$

$P_{sat(T),1}$

$P_{vapor,1}$

ω_1

จากนั้นกำหนดให้ $\eta_{comp.} = 0.9662$ แทนค่าที่ทราบในสมการ (2.25), (2.26), (2.27) และ (2.28) จะได้

$\left(\overline{C}_p\right)_{wet_air,1}$

$k_{wet_air,1}$

T_{2s}

โดยใช้ $\overline{C}_p$ เฉลี่ยในช่วง 298.15 K – 600 K ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\left(\overline{C}_p\right)_{O_2} = 30.98kJ/(kmol \cdot K)$$

$$\left(\overline{C}_p\right)_{N_2} = 29.634kJ/(kmol \cdot K)$$

$$\left(\overline{C}_p\right)_{H_2O} = 35.171kJ/(kmol \cdot K)$$

จากนั้นจึงแทนค่าต่าง ๆที่ทราบในสมการ (2.30) และ (2.31) จะได้อุณหภูมิขาออกเครื่องอัดอากาศ และงานของเครื่องอัดอากาศตามลำดับ

3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้

กำหนดให้ $\eta_{comb.} = 0.9724$ ดังนั้น แทนค่าที่ทราบในสมการ (2.38), (2.39), (2.40), (2.41) จะทราบค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$\sum_R n_i \left(\bar{h}_f^O\right)_i - \sum_P n_e \left(\bar{h}_f^O\right)_e$$

$$\left(\bar{C}_P\right)_{exhaust,3}$$

$$\left(\bar{C}_p\right)_{wet_air,2}$$

โดยใช้ $\bar{C}_p$ เฉลี่ยในช่วง 298.15 K – 1600 K ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\left(\bar{C}_p\right)_{O_2} = 33.988 kJ/(kmol \cdot K)$$

$$\left(\bar{C}_p\right)_{N_2} = 32.068 kJ/(kmol \cdot K)$$

$$\left(\bar{C}_p\right)_{H_2O} = 40.286 kJ/(kmol \cdot K)$$

$$\left(\bar{C}_p\right)_{CO_2} = 51.953 kJ/(kmol \cdot K)$$

$$\left(\bar{C}_p\right)_{fuel} = 38.443 kJ/(kmol \cdot K)$$

จากนั้นจึงแทนค่าที่ทราบในสมการ (2.44)จะได้อุณหภูมิขาออกของห้องเผาไหม้

3.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันก๊าซ

กำหนดให้ $\eta_{turb.} = 0.9061$ ดังนั้น แทนค่าที่ทราบในสมการ (2.22), (2.47), (2.48), (2.49), (2.50), (2.51), (2.52) และ (2.53) จะทราบค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$\dot{n}_{exhaust}$$

$$\left(\bar{C}_p\right)_{exhaust,4}$$

$$k_{exhaust,4}$$

$$T_{4s}$$

โดยใช้ $\bar{C}_p$ เฉลี่ยในช่วง 298.15 K – 600 K ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\left(\bar{C}_p\right)_{O_2} = 30.98 kJ/(kmol \cdot K)$$

$$\left(\bar{C}_p\right)_{N_2} = 29.634 kJ/(kmol \cdot K)$$

$$\left(\bar{C}_p\right)_{H_2O} = 35.171 kJ/(kmol \cdot K)$$

$$\left(\bar{C}_p\right)_{CO_2} = 43.851 kJ/(kmol \cdot K)$$

จากนั้นจึงแทนค่าต่าง ๆที่ทราบในสมการ (2.55) และ (2.56) จะได้อุณหภูมิขาออกเครื่องอัดอากาศ และงานของเครื่องอัดอากาศตามลำดับ

3.3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กำหนดให้ $\eta_{gen.} = 0.9199$ ดังนั้น สามารถคำนวณงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากสมการ

$$\dot{W}_{gen.} = \eta_{gen.}\left(\dot{W}_{turb.} + \dot{W}_{comp.}\right)$$

3.3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

เพราะฉะนั้นแทนค่าที่ทราบในสมการการหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ก็สามารถประมาณค่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้

$$\eta_{GT.} = \frac{\dot{W}_{gen.}}{\dot{n}_{fuel} \times \left(\sum_{R} n_i \left(\bar{h}_f^0\right)_i - \sum_{P} n_e \left(\bar{h}_f^0\right)_e \right)}$$