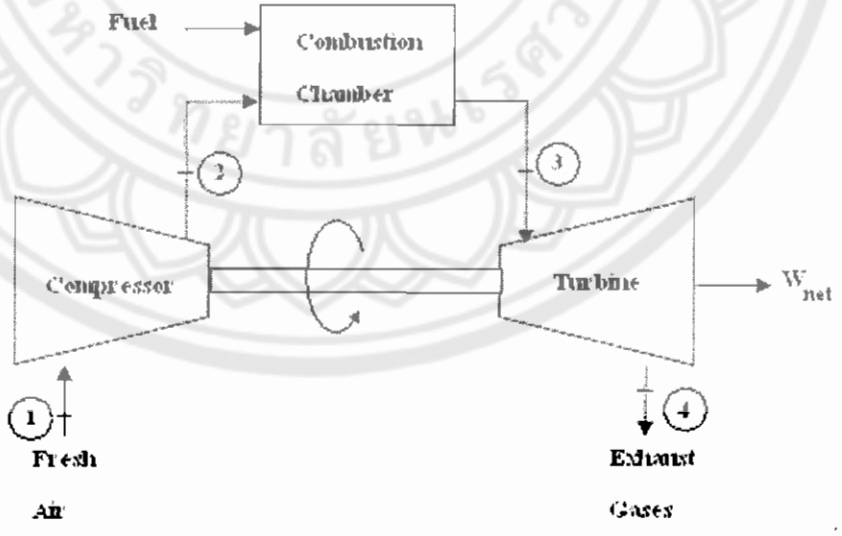
บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัฏจักรในอุตมคติของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Brayton Cycle)

วัฏจักร Brayton ถูกเสนอครั้งแรกโดย George Brayton เพื่อใช้ในเครื่องยนต์ Reciprocating oil-burning ที่เขาเป็นผู้พัฒนาราวปี ค.ศ. 1870 ในปัจจุบัน เครื่องยนต์นี้ถูกใช้ในกังหันก๊าซ (Gas Turbine) เท่านั้นโดยที่กระบวนการอัดและการขยายตัวเกิดขึ้นภายในเครื่องจักรแบบหมุน (Rotating machinery) โดยปกติ กังหันก๊าซจะทำงานในลักษณะวัฏจักรเปิด (Open cycle) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 อากาศบริสุทธิ์ที่อยู่รอบๆจะถูกดูดเข้าไปในเครื่องอัด ทำให้อุณหภูมิและความดันของอากาศเพิ่มสูงขึ้น และอากาศที่มีความดันสูงนี้จะไหลเข้าสู่ห้องสันดาปที่ซึ่งเชื้อเพลิงจะเกิดการเผาไหม้ที่ความดันคงที่ หลังจากนั้นก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงนี้จะไหลเข้าสู่กังหันก๊าซและเกิดการขยายตัวไปยังความดันบรรยากาศ ทำให้ได้กำลังออกมา ก๊าซจะถูกระบายออกจากกังหันและปล่อยทิ้งไป ด้วยสาเหตุนี้วัฏจักร Brayton จึงถูกจัดให้อยู่ในประเภทวัฏจักรเปิด



รูปที่ 2.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ทำงานในลักษณะวงจรเปิด

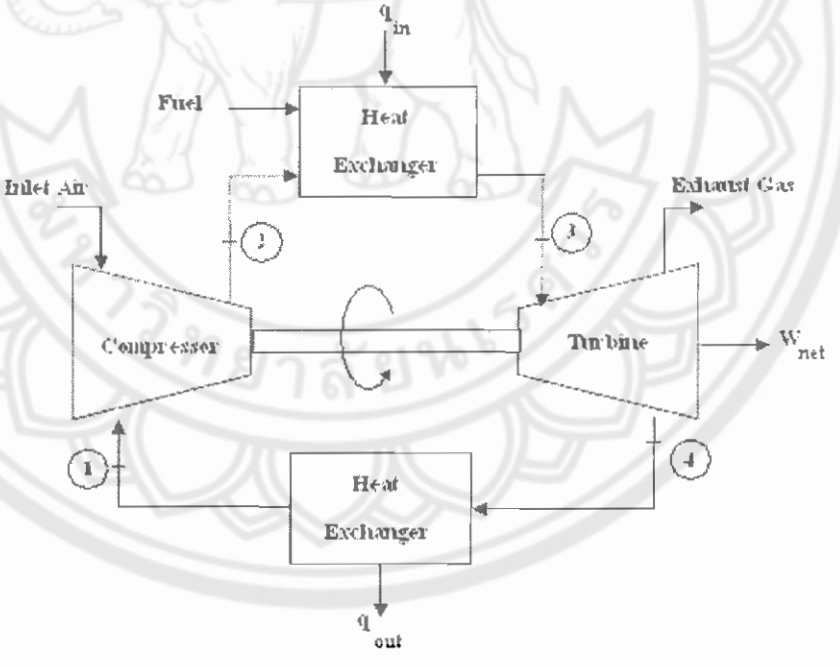
วัฏจักรกังหันก๊าซแบบเปิด (Open Gas Turbine Cycle) ที่กล่าวข้างต้น สามารถอธิบายในลักษณะวัฏจักรปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ได้โดยใช้ Air Standard Assumptions กระบวนการอัดและการขยายตัวในวัฏจักรนี้จะยังคงเหมือนเดิม แต่กระบวนการเผาไหม้จะถูกแทนที่ด้วยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอก ภายใต้กระบวนการความดันคงที่ และการระบายก๊าซร้อนออกสู่บรรยากาศจะถูกแทนที่ด้วยการคายความร้อนสู่แหล่งความร้อนภายนอก ภายใต้กระบวนการความดันคงที่ วัฏจักรอุดมคติที่ของไหลทำงานไหลอยู่ภายในวงปิดนี้เรียกว่า วัฏจักร Brayton ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการผันกลับได้แบบภายใน4 กระบวนการด้วยกัน คือ

1 – 2 กระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic) เกิดขึ้นภายในเครื่องอัดอากาศ

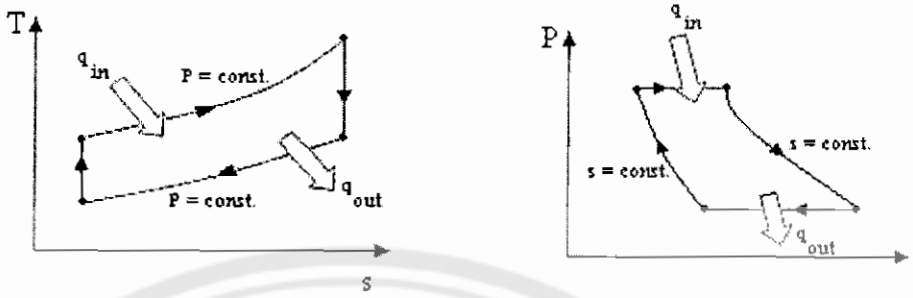
2 – 3 กระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ เกิดขึ้นที่ห้องเผาไหม้

3 – 4 กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก เกิดขึ้นภายในกังหัน

4 – 1 กระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ เกิดขึ้นเมื่อระบายก๊าซร้อนสู่บรรยากาศ



รูปที่ 2.2 เครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ทำงานในลักษณะวัฏจักรปิด



(a) T-s diagram (b) P-v diagram

รูปที่ 2.3 แผนภาพ T-s และ P-v ของวัฏจักร Brayton

สำหรับโรงไฟฟ้าบริษัท ไตรเอนเนอจี้ จำกัด ใช้กังหันก๊าซยี่ห้อ GE รุ่น MS9001 FA+ ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะของเครื่องที่ใช้ในการออกแบบ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลจำเพาะของกังหันก๊าซยี่ห้อ GE รุ่น MS9001 FA+
(ที่มา: Combined Cycle Fundamentals Manual)

Air In :	76 ^{o}F
Base :	230 kW
Fuel :	Natural Gas
Turbine Exhaust :	1156 ^{o}F
Pressure Exhaust :	13.5 in. H_2O
Compressor Stages :	17
RPM :	3000
Turbine Stage :	3

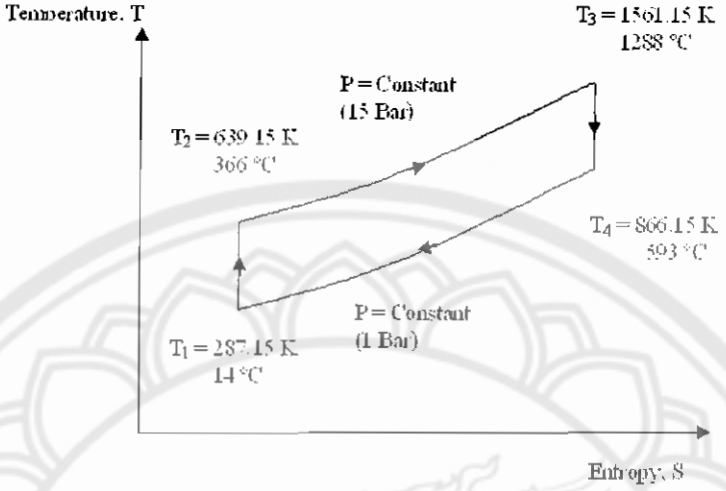
โดยที่ข้อมูลสภาวะที่ออกแบบสามารถแสดงได้ดัง T-s Diagram ตามรูปที่ 2.4 กระบวนการต่าง ๆ เป็นดังนี้

1 – 2 เป็นกระบวนการอัดตัวแบบไอเซนทรอปิกในคอมเพรสเซอร์

2 – 3 เป็นกระบวนการรับความร้อนภายใต้ความดันคงที่ในห้องเผาไหม้

3 – 4 เป็นกระบวนการขยายตัวแบบไอเซนทรอปิกในกังหันก๊าซ

4 – 1 เป็นกระบวนการถ่ายความร้อนทิ้งภายใต้ความดันคงที่



รูปที่ 2.4 แสดง Ideal Close Brayton Cycle

(ที่มา: Combined Cycle Fundamentals Manual)

2.2 ความเบี่ยงเบนของวัฏจักรกังหันก๊าซจริงจากวัฏจักรกังหันก๊าซอุดมคติ

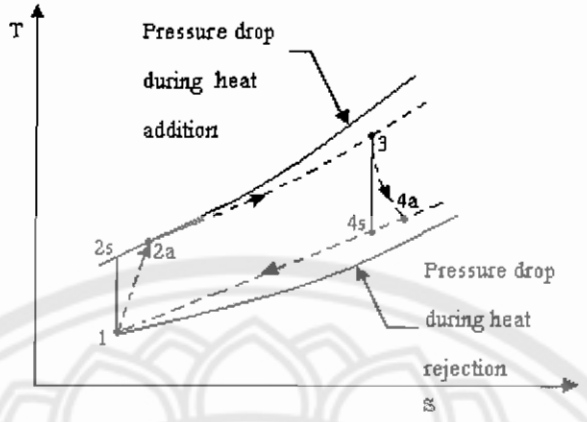
วัฏจักรกังหันก๊าซจริงจะแตกต่างจากวัฏจักรอุดมคติ Brayton มากมายหลายประการด้วยกัน กล่าวคือ ความดันตกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการป้อนความร้อนและคายความร้อน และที่สำคัญคือ งานที่ต้องป้อนให้กับเครื่องอัดจริงจะมากกว่า และงานที่ได้ออกจากกังหันจริงจะน้อยกว่า เนื่องจากปัจจัย Irreversibilities เช่นแรงเสียดทาน และอุปกรณ์ที่ทำงานในสภาวะ Non-Quasi-Equilibrium เป็นต้น ความเบี่ยงเบนของเครื่องอัดจริงและกังหันจริงจากอุดมคติแบบไอเซนทรอปิก สามารถแสดงในเทอมของประสิทธิภาพแอเดียเบติกของเครื่องอัดและกังหันดังนี้

$$\eta_C = \frac{w_s}{w_a} \cong \frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_{2a}} \tag{2.1}$$

และ

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} \cong \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \tag{2.2}$$

เมื่อสภาวะ 2a และ 4a คือสภาวะจริงที่ทางออกของเครื่องอัดและกังหันตามลำดับ และ 2s และ 4s คือสภาวะที่กระบวนการเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิก ดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 ความเบี่ยงเบนของวัฏจักรกังหันก๊าซจริงจากวัฏจักรอุดมคติ Brayton เนื่องจากปัจจัย Irreversiblities

2.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงกับอากาศชื้น

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงในที่นี้จะคิดว่าเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ อากาศแห้งสมมติว่าประกอบด้วย ออกซิเจน 21 % ไนโตรเจน 78 % และ อาร์กอน 1 % โดยปริมาตร แต่ในการคำนวณการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะคิดว่าอากาศแห้งประกอบด้วย ออกซิเจน 21% ไนโตรเจน 79 % โดยคิดว่าไนโตรเจนจากบรรยากาศมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 28.16 ซึ่งเป็นมวลโมเลกุลที่รวมอาร์กอนเข้าไปด้วย (มวลโมเลกุลของไนโตรเจนบริสุทธิ์เท่ากับ 28.013) เมื่อคิดว่าอากาศเป็นของผสม (Mixture) ตามแบบจำลองของดาลตัน (Dalton) ซึ่งจะได้ว่าสัดส่วนโดยโมลเท่ากับสัดส่วนโดยปริมาตร

อากาศชื้นที่มีอัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) เท่ากับ ω หมายความว่า

อากาศแห้ง 1 kg จะมีไอน้ำติดมาด้วย ω kg

เนื่องจากมวลโมเลกุลของอากาศเท่ากับ 28.97 ดังนั้น

อากาศแห้ง $\frac{1}{28.97}$ kmol จะมีไอน้ำติดมาด้วย $\frac{\omega}{18}$ kmol

อากาศแห้ง 1 kmol จะมีไอน้ำติดมาด้วย $28.97 \times \frac{\omega}{18}$ kmol

เนื่องจากอากาศแห้ง 1 kmol มี O_2 0.21 kmol และ N_2 0.79 kmol ดังนั้น

O_2 0.21 kmol มี N_2 ติดมาด้วย 0.79 kmol และ H_2O $28.97 \times \frac{\omega}{18}$ kmol

หรือ

$$O_2 \ 1 \ \text{kmol} \ \text{มี} \ N_2 \ \text{ติดมาด้วย} \quad \frac{0.79}{0.21} = 3.76 \ \text{kmol}$$

$$\text{และ} \ H_2O \ \frac{1}{0.21} \times 28.97 \times \frac{\omega}{18} = 7.66 \ \text{mol}$$

2.3.1 ส่วนผสมของก๊าซธรรมชาติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซใน โรงไฟฟ้า Tri-energy ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติที่ใช้มาจาก 2 แหล่งได้แก่ แหล่งยาดานา และ เยตากุน องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติของแต่ละแหล่งแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมของก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในโรงไฟฟ้า Tri Energy (ที่มา : **www.pptplc.com**)

Composition and Properties of Gas	แหล่งยาดานา	แหล่งเยตากุน
CH_4	69.099	79.110
C_2H_6	0.915	7.360
C_3H_8	0.167	2.550
$I\text{-}C_4H_{10}$	0.018	0.550
$N\text{-}C_4H_{10}$	0.028	0.640
$I\text{-}C_5H_{12}$	0.008	0.240
$N\text{-}C_5H_{12}$	0.003	0.140
C_{6+}	0.020	0.150
CO_2	4.144	6.970
N_2	25.598	2.290
Specific Gravity	0.71	0.72
Gross Heating Value	711.40	1,041.61

2.3.2 สมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงกับอากาศชื้น

ในการเผาไหม้ จะถือว่า ไนโตรเจนและ ไอน้ำไม่มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาและไม่มีการใช้อากาศต่ำกว่าทฤษฎี ดังนั้นถือว่าเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ไม่เกิดเขม่าและคาร์บอนมอนอกไซด์

สมการเผาไหม้ของ CH_4 กับอากาศชื้นจะเขียนได้ดังนี้

$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 2\times 3.76N_2 + 2\times 7.66\omega H_2O \quad (2.3)$$

ถ้าเป็นการเผาไหม้ที่มีการใช้อากาศเกิน โดยใช้ Equivalent ratio เท่ากับ ϕ จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$CH_4 + \frac{1}{\phi}\times 2(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + \frac{1}{\phi}\times 2\times 3.76N_2 + \frac{1}{\phi}\times 2\times 7.66\omega H_2O + \left(\frac{1}{\phi}-1\right)\times 2O_2 \quad (2.4)$$

$$C_2H_6 + \frac{1}{\phi}\times 3.5(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + \frac{1}{\phi}\times 3.5\times 3.76N_2 + \frac{1}{\phi}\times 3.5\times 7.66\omega H_2O + \left(\frac{1}{\phi}-1\right)\times 3.5O_2 \quad (2.5)$$

$$C_3H_8 + \frac{1}{\phi}\times 5(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + \frac{1}{\phi}\times 5\times 3.76N_2 + \frac{1}{\phi}\times 5\times 7.66\omega H_2O + \left(\frac{1}{\phi}-1\right)\times 5O_2 \quad (2.6)$$

$$I-C_4H_{10} + \frac{1}{\phi}\times 6.5(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O + \frac{1}{\phi}\times 6.5\times 3.76N_2 + \frac{1}{\phi}\times 6.5\times 7.66\omega H_2O + \left(\frac{1}{\phi}-1\right)\times 6.5O_2 \quad (2.7)$$

$$N-C_4H_{10} + \frac{1}{\phi}\times 6.5(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O + \frac{1}{\phi}\times 6.5\times 3.76N_2 + \frac{1}{\phi}\times 6.5\times 7.66\omega H_2O + \left(\frac{1}{\phi}-1\right)\times 6.5O_2 \quad (2.8)$$

$$I-C_5H_{12} + \frac{1}{\phi}\times 8(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O + \frac{1}{\phi}\times 8\times 3.76N_2 + \frac{1}{\phi}\times 8\times 7.66\omega H_2O + \left(\frac{1}{\phi}-1\right)\times 8O_2 \quad (2.9)$$

$$N-C_5H_{12} + \frac{1}{\phi}\times 8(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O + \frac{1}{\phi}\times 8\times 3.76N_2 + \frac{1}{\phi}\times 8\times 7.66\omega H_2O + \left(\frac{1}{\phi}-1\right)\times 8O_2 \quad (2.10)$$

$$C_6 + \frac{1}{\phi}\times 6(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow 6CO_2 + \frac{1}{\phi}\times 6\times 3.76N_2 + \frac{1}{\phi}\times 8\times 7.66\omega H_2O + \left(\frac{1}{\phi}-1\right)\times 6O_2 \quad (2.11)$$

$$CO_2 \rightarrow CO_2 \quad (2.12)$$

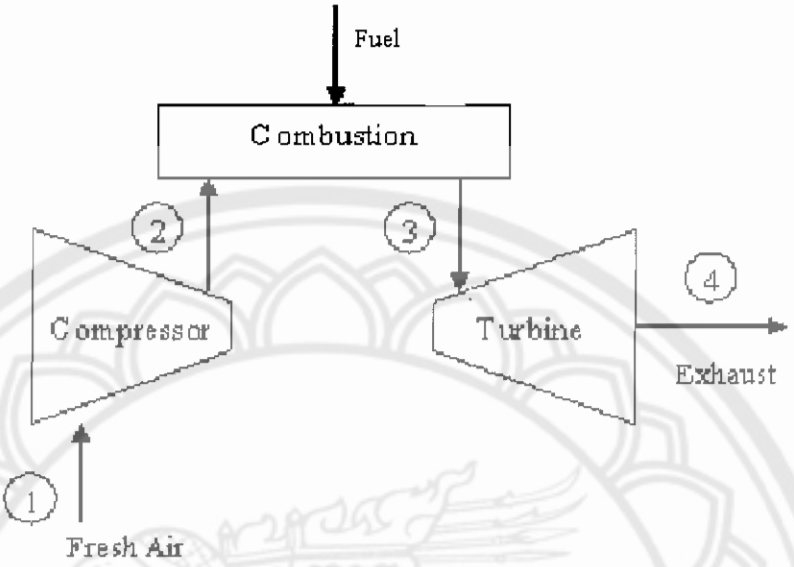
$$N_2 \rightarrow N_2 \quad (2.13)$$

เนื่องจากไม่ทราบสัดส่วนของเชื้อเพลิงจากแหล่งยาตานาต่อเชื้อเพลิงจากแหล่งเยตากุน ดังนั้นสมมติอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงจากทั้ง 2 แหล่งเท่ากับ 0.2 : 0.8

เมื่อคูณสัดส่วนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและนำสมการทั้งหมดรวมกันจะได้สมการเผาไหม้เชื้อเพลิงดังนี้

$$fuel + \frac{1}{\phi}1.9527(O_2 + 3.76N_2 + 7.66\omega H_2O) \rightarrow 1.0799CO_2 + 1.8737H_2O + \frac{1}{\phi}7.4118N_2 + \frac{1}{\phi}14.9579\omega H_2O + \left(\frac{1}{\phi}-1\right)1.9527O_2 \quad (2.14)$$

2.4 การสร้างแบบจำลองของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ



รูปที่ 2.6 แสดงแบบจำลองของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

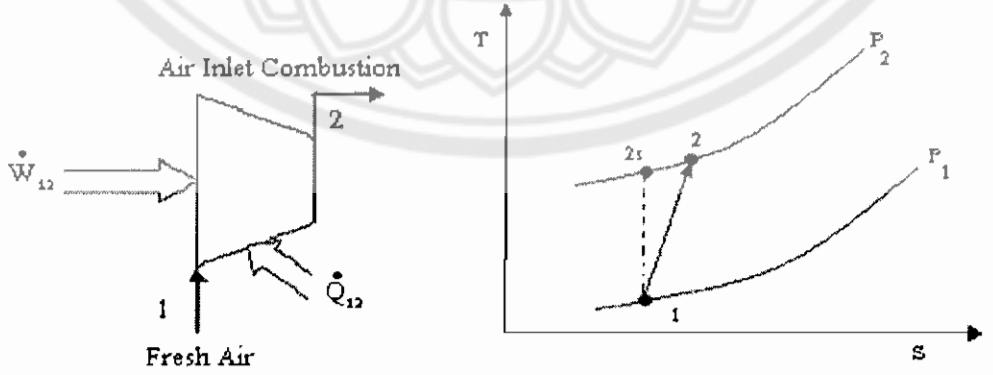
จากรูปที่ 2.6 จะเขียนสมการสำหรับอัตราการไหลโดยโมลได้ดังนี้

$$\dot{n}_{wet_air} = \dot{n}_{O_2} + \dot{n}_{N_2} + \dot{n}_{H_2O} = \frac{1}{\phi}1.7557 \times \dot{n}_{Fuel} + \frac{1}{\phi}1.7557 \times 3.67 \times \dot{n}_{Fuel} + \frac{1}{\phi}1.7557 \times 7.66\omega \times \dot{n}_{Fuel} \quad (2.15)$$

$$\dot{n}_{exhaust} = \dot{n}_{CO_2} + \dot{n}_{H_2O} + \dot{n}_{N_2} + \dot{n}_{O_2}$$

$$= 0.9597 \times \dot{n}_{Fuel} + \left(1.7032 + \frac{1}{\phi}13.4489\omega\right) \times \dot{n}_{Fuel} + \frac{1}{\phi}6.7410 \times \dot{n}_{Fuel} + \left(\frac{1}{\phi} - 1\right) \times 1.7557 \times \dot{n}_{Fuel} \quad (2.16)$$

2.4.1 การสร้างแบบจำลองของคอมเพรสเซอร์



a. b.

รูปที่ 2.7 แสดงแบบจำลองของคอมเพรสเซอร์ (รูป a)

และ T-s Diagram ของ Compressor (รูป b)

กฎข้อที่ 1 สำหรับคอมเพรสเซอร์ที่ทำงานภายใต้กระบวนการ Reversible adiabatic

$$\dot{n}_{wet_air} h_1 = \dot{n}_{wet_air} h_{2s} + \dot{W}_{s_comp.} \tag{2.17}$$

$$\dot{W}_{s_comp.} = \dot{n}_{wet_air}\left(h_1 - h_{2s}\right) = \dot{n}_{wet_air}\left(\overline{C}_p\right)_{wet_air}\left(T_1 - T_{2s}\right) \tag{2.18}$$

$$\left(\overline{C}_p\right)_{wet_air} = y_{O_2}\left(\overline{C}_p\right)_{O_2} + y_{N_2}\left(\overline{C}_p\right)_{N_2} + y_{H_2O}\left(\overline{C}_p\right)_{H_2O} \tag{2.19}$$

$$y_{O_2} = \frac{1}{1+3.76+7.66\omega} \;;\; y_{N_2} = \frac{3.76}{1+3.76+7.66\omega} \;;\; y_{H_2O} = \frac{7.66\omega}{1+3.76+7.66\omega} \tag{2.20}$$

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

ถ้าทราบความดันขาเข้าและขาออกคอมเพรสเซอร์ T_{2s} หาได้ดังนี้

$$T_{2s} = T_1\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k_{wet_air}-1}{k_{wet_air}}} \tag{2.21}$$

$$k_{wet_air} = \frac{\left(\overline{C}_p\right)_{wet_air}}{\left(\overline{C}_v\right)_{wet_air}} = \frac{\left(\overline{C}_p\right)_{wet_air}}{\left(\overline{C}_p\right)_{wet_air} - \overline{R}} \tag{2.22}$$

จากนิยามประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์

$$\eta_{comp.} = \frac{\dot{W}_{s_comp.}}{\dot{W}_{comp.}} = \frac{T_1 - T_{2s}}{T_1 - T_2} \tag{2.23}$$

ดังนั้น

$$\dot{W}_{comp.} = \frac{1}{\eta_{comp.}}\dot{n}_{wet_air}\left(\overline{C}_p\right)_{wet_air}\left(T_1 - T_{2s}\right) \tag{2.24}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{1}{\eta_{comp.}}\left(T_{2s} - T_1\right) \tag{2.25}$$

2.4.2 การสร้างแบบจำลองของห้องเผาไหม้

รูปที่ 2.8 แสดงแบบจำลองของห้องเผาไหม้

สมมติเป็นการเผาไหม้ที่ความดันคงที่ดังนั้น P3 = P2

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิคส์ สำหรับปฏิกิริยาเคมีเขียนได้ดังนี้

$$q_{c.v.} + \sum_R n_i(\bar{h}_f^O + \Delta\bar{h})_i = w_{c.v.} + \sum_P n_e(\bar{h}_f^O + \Delta\bar{h})_e \qquad (2.26)$$

หน่วยของ $q_{c.v.}$ และ $w_{c.v.}$ คือ $kJ/kmol_{fuel}$

การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ ไม่เกิดงานดังนั้น

$$q_{c.v.} + \sum_R n_i(\bar{h}_f^O + \Delta\bar{h})_i = \sum_P n_e(\bar{h}_f^O + \Delta\bar{h})_e \qquad (2.27)$$

$$q_{c.v.} + \sum_R n_i\left(\bar{h}_f^O\right)_i - \sum_P n_e\left(\bar{h}_f^O\right)_e = \sum_P n_e(\Delta\bar{h})_e - \sum_R n_i(\Delta\bar{h})_i \qquad (2.28)$$

นิยามประสิทธิภาพห้องเผาไหม้ η_{comb} ดังนี้

$$\eta_{comb.} = \frac{\sum_P n_e(\Delta\bar{h})_e - \sum_R n_i(\Delta\bar{h})_i}{\sum_R n_i\left(\bar{h}_f^O\right)_i - \sum_P n_e\left(\bar{h}_f^O\right)_e} \qquad (2.29)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\sum_P n_e(\Delta\bar{h})_e = 1.0799\left(\bar{C}_p\right)_{CO_2}(T_3 - 298.15) + \left(1.8737 + \frac{1}{\phi}(14.9579\omega)\right)\left(\bar{C}_p\right)_{H_2O}(T_3 - 298.15) +$$

$$\frac{1}{\phi}(7.4118)\left(\bar{C}_p\right)_{N_2}(T_3 - 298.15) + \left(\frac{1}{\phi} - 1\right)\left(\bar{C}_p\right)_{O_2}(T_3 - 298.15)$$

$$= \left(\bar{C}_P\right)_{exhaust}(T_3 - 298.15) \qquad (2.30)$$

$$\sum_R n_i(\Delta\bar{h})_i = (\bar{C}_p)_{fuel}(T_f - 298.15) + \frac{1}{\phi}(1.9527)(\bar{C}_p)_{O_2}(T_2 - 298.15) +$$

$$\frac{1}{\phi}(1.9527)(3.76)(\bar{C}_p)_{N_2}(T_2 - 298.15) + \frac{1}{\phi}(1.9527)(7.66\omega)(\bar{C}_p)_{H_2O}(T_2 - 298.15)$$

$$= (\bar{C}_p)_{fuel}(T_f - 298.15) + (\bar{C}_p)_{wet_air}(T_2 - 298.15) \quad (2.31)$$

$$\sum_R n_i(\bar{h}_f^O)_i = (\bar{h}_f^O)_{fuel} + \frac{1}{\phi}(1.9527)(7.66\omega)(\bar{h}_f^O)_{H_2O} \quad (2.32)$$

$$\sum_P n_e(\bar{h}_f^O)_e = 1.0799(\bar{h}_f^O)_{CO_2} + \left(1.8737 + \frac{1}{\phi}(14.9579\omega)\right)(\bar{h}_f^O)_{H_2O} \quad (2.33)$$

$$(\bar{C}_p)_{exhaust} = 1.0799(\bar{C}_p)_{CO_2} + \left(1.8737 + \frac{1}{\phi}(14.9579\omega)\right)(\bar{C}_p)_{H_2O}$$

$$+ \frac{1}{\phi}(7.4118)(\bar{C}_p)_{N_2} + \left(\frac{1}{\phi} - 1\right)(1.9527)(\bar{C}_p)_{O_2} \quad (2.34)$$

$$(\bar{C}_p)_{wet_air} = \frac{1}{\phi}(1.7557)(\bar{C}_p)_{O_2} + \frac{1}{\phi}(1.7557)(3.76)(\bar{C}_p)_{N_2} \quad (2.35)$$

$$+ \frac{1}{\phi}(1.7557)(7.66\omega)(\bar{C}_p)_{H_2O} \quad (2.35)$$

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

เนื่องจาก $\sum_R n_i(\bar{h}_f^O)_i - \sum_P n_e(\bar{h}_f^O)_e$ คือค่า Heating value

$\sum_P n_e(\Delta\bar{h})_e - \sum_R n_i(\Delta\bar{h})_i$ คือการเพิ่มขึ้นของ Enthalpy ของสารทำงาน จากกฎข้อที่ 1 จะเห็นว่า ถ้า $q_{c.v.} = 0$ แล้ว

$$\sum_R n_i(\bar{h}_f^O)_i - \sum_P n_e(\bar{h}_f^O)_e = \sum_P n_e(\Delta\bar{h})_e - \sum_R n_i(\Delta\bar{h})_i \quad (2.36)$$

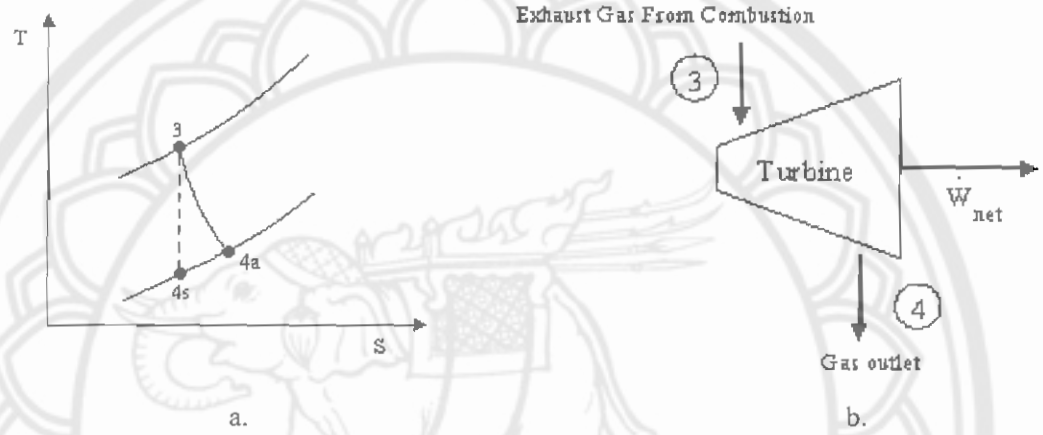
นั่นคือ ความร้อนที่ได้จาก ปฏิกิริยาเคมีจะถูกถ่ายเทให้สารทำงานทั้งหมด ดังนั้น $\eta_{comb.}$ หมายถึง ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้นั่นเอง

ถ้าทราบประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ จะสามารถหาอุณหภูมิขาออกของห้องเผาไหม้ได้ ดังนี้

$$\eta_{comb.} = \frac{(\bar{C}_p)_{exhaust}(T_3 - 298.15) - (\bar{C}_P)_{fuel}(T_f - 298.15) - (\bar{C}_p)_{wet_air}(T_2 - 298.15)}{\sum_R n_i(\bar{h}_f^O)_i - \sum_P n_e(\bar{h}_f^O)_e} \quad (2.37)$$

$$T_3 = 298.15 + \left\{ \frac{1}{(\overline{C}_p)_{exhaust}} \left[\begin{array}{l} \eta_{comb.} \left(\sum_R n_i \left(\overline{h}_f^O\right)_i - \sum_P n_e \left(\overline{h}_f^O\right)_e \right) + \left(\overline{C}_P\right)_{fuel} \left(T_f - 298.15\right) \\ + \left(\overline{C}_p\right)_{wet_air} \left(T_2 - 298.15\right) \end{array} \right] \right\} \quad (2.38)$$

2.4.3 การสร้างแบบจำลองของกังหันก๊าซ



รูปที่ 2.9 แสดง T-s Diagram (a) และแบบจำลองของกังหันก๊าซ (b)

กฎข้อที่ 1 สำหรับกังหันก๊าซที่ทำงานภายใต้กระบวนการ Reversible adiabatic

$$\dot{n}_{exhaust} h_3 = \dot{n}_{exhaust} h_{4s} + \dot{W}_{s_turb.} \quad (2.39)$$

$$\dot{W}_{s_turb.} = \dot{n}_{exhaust} \left(h_3 - h_{4s}\right) = \dot{n}_{exhaust} \left(\overline{C}_p\right)_{exhaust} \left(T_3 - T_{4s}\right) \quad (2.40)$$

$$\left(\overline{C}_p\right)_{exhaust} = y_{CO_2} \left(\overline{C}_p\right)_{CO_2} + y_{H_2O} \left(\overline{C}_p\right)_{H_2O} + y_{N_2} \left(\overline{C}_p\right)_{N_2} + y_{O_2} \left(\overline{C}_p\right)_{O_2} \quad (2.41)$$

$$y_{CO_2} = \frac{1.0799}{1.0799 + \left(1.8737 + \frac{1}{\phi} 14.9579\omega\right) + \frac{1}{\phi} 7.4118 + \left(\frac{1}{\phi} - 1\right) \times 1.9527} \quad (2.42)$$

$$y_{H_2O} = \frac{\left(1.8737 + \frac{1}{\phi} 14.9579\omega\right)}{1.0799 + \left(1.8737 + \frac{1}{\phi} 14.9579\omega\right) + \frac{1}{\phi} 7.4118 + \left(\frac{1}{\phi} - 1\right) \times 1.9527} \quad (2.43)$$

$$y_{N_2} = \frac{\frac{1}{\phi} 7.4118}{1.0799 + \left(1.8737 + \frac{1}{\phi} 14.9579\omega\right) + \frac{1}{\phi} 7.4118 + \left(\frac{1}{\phi} - 1\right) \times 1.9527} \quad (2.44)$$

$$y_{O_2} = \frac{\left(\frac{1}{\phi} - 1\right) \times 1.9527}{1.0799 + \left(1.8737 + \frac{1}{\phi} 14.9579\omega\right) + \frac{1}{\phi} 7.4118 + \left(\frac{1}{\phi} - 1\right) \times 1.9527} \quad (2.45)$$

ในกรณีนี้ใช้ $\overline{C}_p$ เฉลี่ยในช่วง 298.15 K – 1600 K

ถ้าทราบความดันขาเข้าและขาออกของกังหันก๊าซ T_{4s} หาได้ดังนี้

$$T_{4s} = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k_{exhaust}-1}{k_{exhaust}}} \quad (2.46)$$

$$k_{exhaust} = \frac{\left(\overline{C}_p\right)_{exhaust}}{\left(\overline{C}_v\right)_{exhaust}} = \frac{\left(\overline{C}_p\right)_{exhaust}}{\left(\overline{C}_p\right)_{exhaust} - \overline{R}} \quad (2.47)$$

จากนิยามประสิทธิภาพของกังหันก๊าซ

$$\eta_{turb.} = \frac{\dot{W}_{turb.}}{\dot{W}_{s_turb.}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \quad (2.48)$$

ดังนั้น

$$\dot{W}_{turb.} = \eta_{turb.} \dot{n}_{exhaust} \left(\overline{C}_p\right)_{exhaust} \left(T_3 - T_{4s}\right) \quad (2.49)$$

$$T_4 = T_3 - \eta_{turb.} \left(T_3 - T_{4s}\right) \quad (2.50)$$

2.4.4 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สมการหาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\eta_{gen.} = \frac{\dot{W}_{gen.}}{\dot{W}_{turb.} - \dot{W}_{comp.}} \quad (2.51)$$

2.4.5 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

สมการหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

$$\eta_{GT.} = \frac{\dot{W}_{gen.}}{\dot{n}_{fuel} \times \left(\sum_R n_i \left(\overline{h}_f^0\right)_i - \sum_P n_e \left(\overline{h}_f^0\right)_e\right)} \quad (2.52)$$