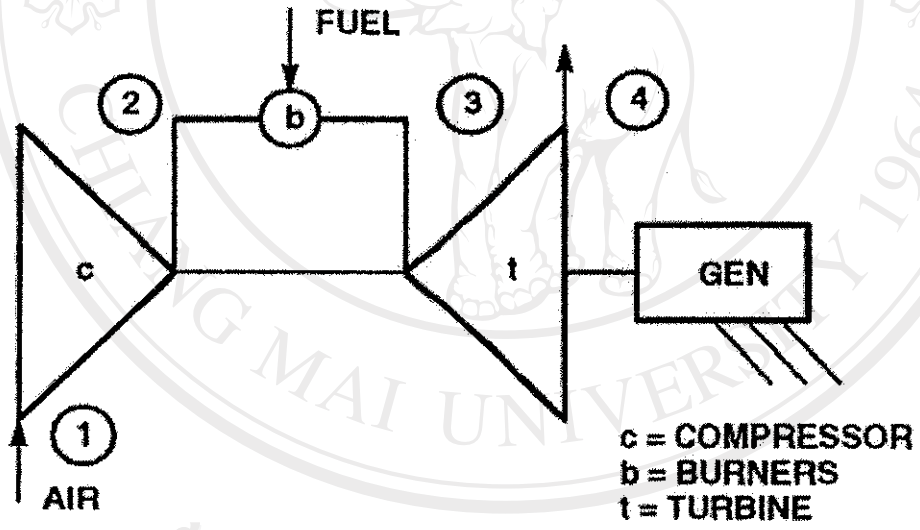
บทที่ 3
การวิเคราะห์สมรรถนะระบบกังหันก๊าซ

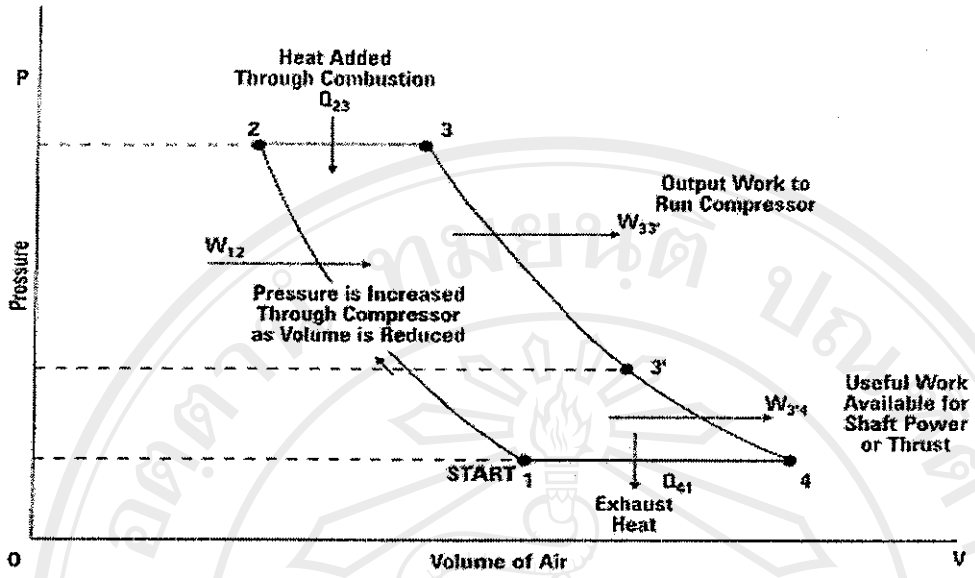
3.1 หลักการโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ

โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซเป็นโรงไฟฟ้าที่นำพลังงานจากก๊าซร้อนที่มีพลังงานจลน์ ซึ่งมีความดันและอุณหภูมิสูงที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไปขับเคลื่อนกังหันก๊าซเพื่อเป็นเครื่องจักรต้นกำลังสำหรับหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า รูปที่ 3.1 แสดงวงจรการทำงานของโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ เครื่องกรองอากาศ (Air Inlet Filter) เครื่องอัดอากาศ (Compressor) กังหันก๊าซ (Gas Turbine) ห้องเผาไหม้ (Combustor) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)



รูปที่ 3.1 วงจรการทำงานของโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรเบรย์ตัน (Brayton Cycle, Basic Gas Turbine Engines, 2004)

3.2 วงจรการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

วงจรการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ มีชื่อเรียกทั่วไปว่า วัฏจักรเบรย์ตัน (Brayton Cycle) หรือ วัฏจักรความดันคงที่ (Constant Pressure Cycle) ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ก๊าซร้อนไปขับเคลื่อนกังหันก๊าซนั้นดำเนินการภายใต้สภาวะความดันคงที่ รูปที่ 3.2 แสดงวัฏจักรเบรย์ตัน (Brayton Cycle) ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ เครื่องอัดอากาศ ห้องเผาไหม้ และกังหันก๊าซ ซึ่งเครื่องอัดอากาศและกังหันก๊าซ จะติดตั้งอยู่บนเพลาเดียวกัน โดยเครื่องอัดอากาศจะทำการดูดอากาศจากภายนอก แล้วอัดอากาศให้มีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น อากาศที่ถูกอัดจะไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้และเกิดการเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะไหลต่อไปยังกังหันก๊าซและจะถูกเปลี่ยนไปเป็นงานโดยการขยายตัวผ่านกังหันก๊าซ ซึ่งมีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ก๊าซร้อนจะไหลผ่านใบกังหันก๊าซที่ยึดติดอยู่กับที่ ซึ่งเรียกว่า Turbine Nozzle ณ จุดนี้ก๊าซร้อนจะเกิดการขยายตัวและพลังงานความร้อนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซร้อนที่ออกจาก Turbine Nozzle ซึ่งมีพลังงานจลน์จะไหลเข้าไปยังใบกังหันก๊าซที่ยึดติดกับเพลาของกังหันก๊าซ ซึ่งเรียกว่า Turbine Bucket ในขั้นตอนที่ 2 นี้ พลังงานจลน์จะถูกถ่ายให้กับ Turbine Bucket ทำให้เกิดการหมุนของกังหันก๊าซ และเกิดเป็นงาน (Work) ขึ้นมา ส่วนก๊าซร้อนที่ไหลผ่านกังหันก๊าซ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(Exhaust Gas) จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศ โดยไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ ลักษณะการทำงานของวงจรแบบนี้เรียกว่า วัฏจักรแบบเปิด (Open Cycle)

กระบวนการที่สำคัญที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของกังหันก๊าซ (Basic Gas Turbine Engines, 2004) แบ่งได้เป็น 4 กระบวนการ ดังต่อไปนี้

กระบวนการที่ 1 – 2 กระบวนการนี้เครื่องอัดอากาศจะดูดอากาศจากภายนอกและทำการอัดอากาศให้มีปริมาตรลดลง ส่งผลให้อากาศที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอัดอากาศมีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งในเชิงทฤษฎีแล้วกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เป็นกระบวนการเอนโทรปีคงที่ (Isentropic Process) สามารถคำนวณได้จาก (Meherwan P. Boyce, 1995)

$$W_C = m_a (h_2 - h_1) \quad (3\text{-}1)$$

เมื่อ

W_C = งานที่ใช้ขับเครื่องอัดอากาศ (kW)

m_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

h_1 = เอนทาลปีอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ (kJ/kg)

h_2 = เอนทาลปีอากาศขาออกจากเครื่องอัดอากาศ (kJ/kg)

กระบวนการ 2 – 3 เป็นกระบวนการเผาไหม้ระหว่างอากาศที่ออกจากเครื่องอัดอากาศกับเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ ที่สภาวะความดันคงที่ (Constant Pressure Process) ซึ่งก๊าซร้อนที่ได้จะมีอุณหภูมิและปริมาตรเพิ่มขึ้น พลังงานความร้อนที่ได้จากกระบวนการนี้คำนวณได้จาก (Meherwan P. Boyce, 1995)

$$Q_A = ((m_a + m_f)h_3) - m_a h_2 - m_f h_f) \quad (3\text{-}2)$$

เมื่อ

Q_A = พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไป (kJ/s)

m_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

m_f = อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/s)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

h_f = เอนทาลปีของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

h_2 = เอนทาลปีอากาศขาออกจากเครื่องอัดอากาศ (kJ/kg)

h_3 = เอนทาลปีก๊าซร้อนขาออกจากห้องเผาไหม้ (kJ/kg)

กระบวนการ 3 – 4 เป็นการขยายตัวของก๊าซร้อนที่ออกจากห้องเผาไหม้ผ่านกังหันก๊าซ ซึ่งตามทฤษฎีแล้วเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (Isentropic Process) กระบวนการนี้ปริมาตรก๊าซร้อนจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิก๊าซร้อนจะลดลง งานที่กระทำโดยกังหันก๊าซภายใต้กระบวนการนี้สามารถคำนวณได้จาก (Meherwan P. Boyce, 1995)

$$W_T = (m_a + m_f)(h_3 - h_4) \quad (3\text{-}3)$$

เมื่อ

W_T = งานที่ใช้ขับกังหันก๊าซ (kW)

m_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

m_f = อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/s)

h_3 = เอนทาลปีก๊าซร้อนขาเข้าห้องเผาไหม้ (kJ/kg)

h_4 = เอนทาลปีก๊าซร้อนขาออกจากกังหันก๊าซ (kJ/kg)

กระบวนการ 4 – 1 ก๊าซไอเสีย (Exhaust Gas) จากกังหันก๊าซจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศที่สภาวะความดันคงที่ ซึ่งพลังงานความร้อนที่ปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศ สามารถคำนวณได้จาก (Meherwan P. Boyce, 1995)

$$Q_R = (m_a + m_f)(h_4 - h_1) \quad (3\text{-}4)$$

เมื่อ

Q_R = พลังงานความร้อนที่ปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศ (kJ/s)

m_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

m_f = อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/s)

h_1 = เอนทาลปีอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ (kJ/kg)

h_4 = เอนทาลปีก๊าซร้อนขาออกจากกังหันก๊าซ (kJ/kg)

อนึ่งในกระบวนการ 3 – 4 กรณีของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาเดี่ยว (Single Shaft) พลังงานจลน์ที่เกิดจากการขยายตัวของก๊าซร้อนผ่านกังหันก๊าซซึ่งได้เป็นงานออกมา จะถูกนำไปใช้ขับเครื่องอัดอากาศและเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า ดังนั้นงานที่นำไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรืองานสุทธิที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถคำนวณได้จาก (Meherwan P. Boyce, 1995)

$$W_{NET} = W_T - W_C \tag{3-5}$$

เมื่อ

W_{NET} = งานสุทธิที่ได้ (kW)

W_T = งานที่ได้จากกังหันก๊าซ (kW)

W_C = งานที่ใช้ขับเครื่องอัดอากาศ (kW)

จากวัฏจักรเบรย์ตัน สามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรได้จากอัตราส่วนระหว่างงานสุทธิที่ได้จากเครื่องกังหันก๊าซต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในระบบ ซึ่งในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสุทธิ (Net Thermal Efficiency) ของวัฏจักรดังกล่าว จะสามารถคำนวณได้จาก (Meherwan P. Boyce, 1995)

$$\eta_{NET} = \frac{W_{NET}}{Q_A} \tag{3-6}$$

$$= \frac{(m_a + m_f)(h_3 - h_2) - (m_a + m_f)(h_4 - h_1)}{(m_a + m_f)h_3 - m_a h_2 - m_f h_f} \tag{3-7}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$= 1 - \frac{(h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \tag{3-8}$$

นอกจากนี้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสุทธิ ยังสามารถแสดงได้หลายรูปแบบ เมื่อสมมติให้

1. อัตราการไหลมวลของเชื้อเพลิงน้อยกว่าอัตราการไหลมวลของอากาศ มากๆ ($m_f << m_a$)
2. ค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) และค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (γ) มีค่าคงที่ ตลอดกระบวนการ
3. อัตราส่วนความดัน (Pressure ratio) ของเครื่องอัดอากาศและกังหันก๊าซมีค่าเท่ากัน
4. อุปกรณ์ทั้งหมดทำงานที่ประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น จากสมการที่ (3-2) พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในระบบแสดงได้สมการ

$$Q_A = h_3 - h_2 \tag{3-9}$$

$$= C_p (T_3 - T_2) \tag{3-10}$$

และจากสมการที่ (3-4) พลังงานความร้อนที่ปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศ แสดงได้ดังสมการ

$$Q_R = h_4 - h_1 \tag{3-11}$$

$$= C_p (T_4 - T_1) \tag{3-12}$$

จากสมการที่ (3-8) โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3-9) – (3-12) สามารถแสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสุทธิได้ดังสมการ

$$\eta_{NET} = 1 - \frac{C_p (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)} \tag{3-13}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$= 1 - \frac{T_1\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{T_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} \qquad (3\text{-}14)$$

เนื่องจากกระบวนการ 1-2 และ 3-4 เป็นแบบไอเซนโทรปิค (Isentropic) และ $P_2 = P_3$, $P_4 = P_1$ ดังนั้น

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} = \frac{T_3}{T_4} \qquad (3\text{-}15)$$

แทนสมการที่ (3-15) ในสมการที่ (3-14) ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสุทธิแสดงได้ดังสมการ

$$\eta_{NET} = \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}} \qquad (3\text{-}16)$$

$$= \frac{1}{\left(r_p\right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}} \qquad (3\text{-}17)$$

เมื่อ r_p = อัตราส่วนความดัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3-6) ถึง (3-17) แสดงให้ทราบว่าในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบกังหันก๊าซนั้น สามารถดำเนินการได้โดยการเพิ่มอัตราส่วนความดัน ลดอุณหภูมิอากาศขาเข้า หรือเพิ่มอุณหภูมิก๊าซร้อนที่เข้ากังหันก๊าซ เป็นต้น นอกจากนี้ในการแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซนอกจากค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนแล้ว ยังมีอีกดัชนีหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมใช้แสดงถึงสมรรถนะของระบบกังหันก๊าซ คือ ค่าอัตราส่วนการใช้พลังงานความร้อนต่อหน่วยกำลังผลิต (Heat Rate, HR) ซึ่งนิยามไว้ดังนี้ (Meherwan P. Boyce, 1995)

$$HR_{NET} = \frac{1}{\eta_{NET}} \tag{3-18}$$

$$= \frac{Q_A}{W_{NET}} \tag{3-19}$$

เมื่อ

HR_{NET} = ค่าอัตราส่วนการใช้พลังงานความร้อนต่อหน่วยกำลังผลิตสุทธิ

3.3 การประยุกต์ใช้เครื่องยนต์กังหันก๊าซ

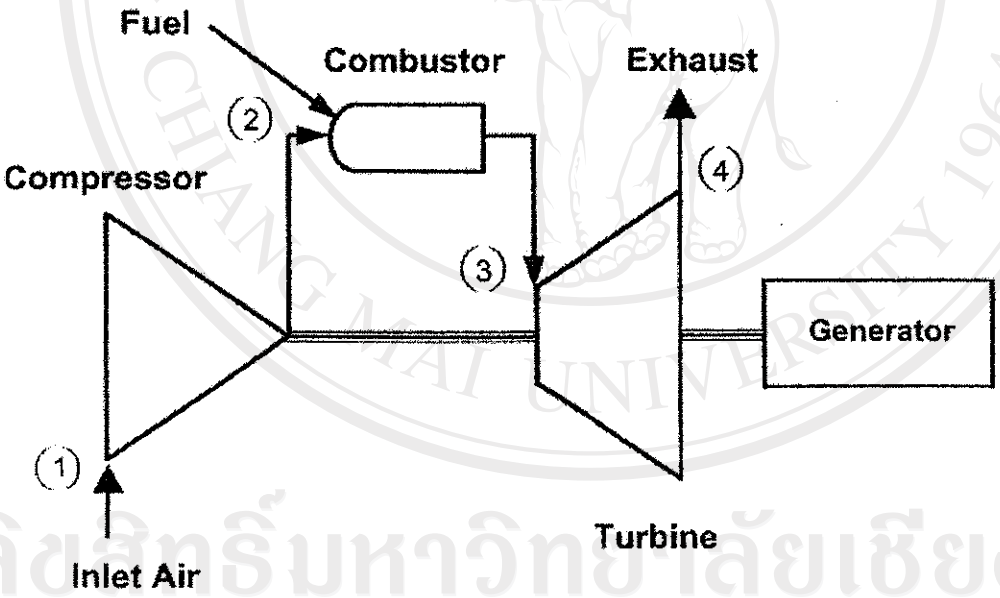
เครื่องยนต์กังหันก๊าซได้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากวงการอากาศยาน (Aircraft Engine) ตั้งแต่ปี ค.ศ.1940 และได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าและอื่นๆ ในปี ค.ศ.1960 ซึ่งขนาดของเครื่องมีตั้งแต่ขนาด 1 MW ขึ้นไป การแบ่งประเภทของเครื่องยนต์กังหันก๊าซจะแบ่งตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะเครื่องยนต์กังหันก๊าซประเภทอุตสาหกรรมหนัก (Heavy Duty Type) ซึ่งเครื่องยนต์กังหันก๊าซประเภทนี้ ที่นิยมใช้งานมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ แบบเพลาเดี่ยว (Single Shaft) และแบบเพลาคู่ (Two Shaft) (http://www.energythai.net/powerplant/gas_turbined.html, 2003)

3.3.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาเดี่ยว (Single Shaft) เครื่องยนต์ประเภทนี้จะมีเครื่องอัดอากาศเชื่อมต่ออยู่บนเพลาเดียวกันกับกังหันก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งกังหันก๊าซจะทำหน้าที่ขับเครื่องอัดอากาศและขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้หมุนไปพร้อมกันด้วยความเร็วรอบที่เท่ากัน ซึ่งพลังงานที่ใช้ขับเครื่องอัดอากาศจะใช้ประมาณ 60 % ของพลังงานที่กังหันก๊าซผลิตได้ (Frank J. Brooks, 2000) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิของไอเสียที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศลดลงตามไปด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

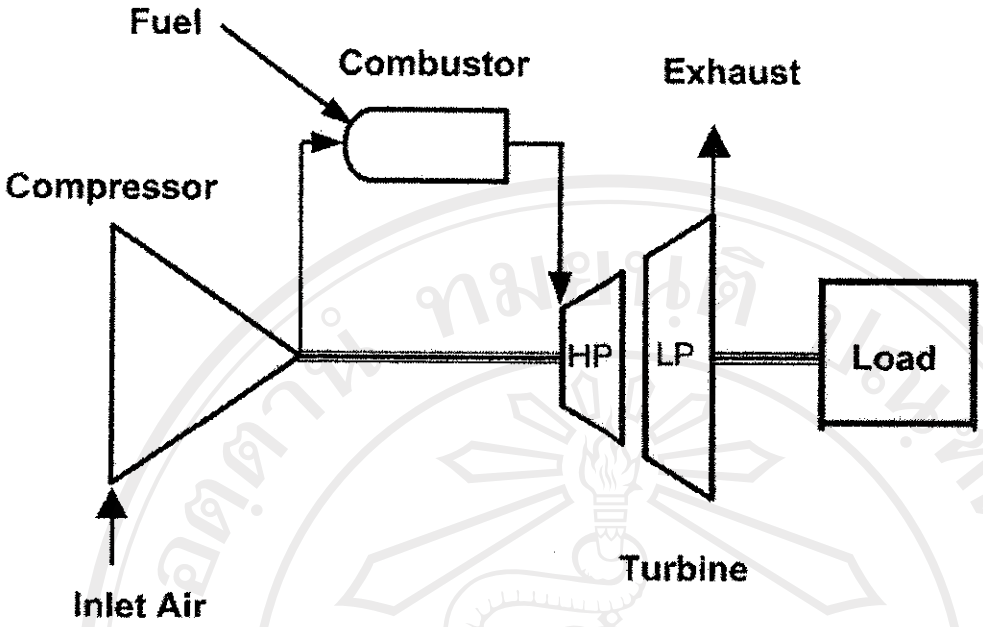
การควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซประเภทนี้ให้คงที่รองรับการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นสามารถควบคุมได้ 2 วิธี คือ การควบคุมอุณหภูมิก๊าซไอเสีย และการควบคุมปริมาณอากาศขาเข้า (http://www.energythai.net/powerplant/gas_turbined.html, 2003)

- การควบคุมอุณหภูมิก๊าซไอเสีย กรณีที่กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะทำการควบคุมประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยการควบคุมปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ในขณะที่ปริมาณอากาศขาเข้ายังคงที่ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกแปรตามกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก
- การควบคุมปริมาณอากาศขาเข้า กรณีที่กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงสามารถควบคุมประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้โดยการควบคุมปริมาณการป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้โดยการปิดเปิดบานควบคุม (Inlet Guide Vane) ซึ่งวิธีนี้จะทำให้อัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศพอเหมาะส่งผลให้อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกมาไม่เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้ามากนัก วิธีการควบคุมแบบนี้เหมาะสมกับกรณีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำและกรณีที่เดินเครื่องแบบพลังความร้อนร่วม เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำความร้อนร่วม (Heat Recovery Steam Generator) จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทำให้ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของไอน้ำที่ผลิตน้อย



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรอย่างง่ายของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาเดี่ยว (Frank J. Brooks, 2000)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรอย่างง่ายของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาคู่ (Frank J. Brooks, 2000)

3.3.2 เครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาคู่ (Two Shaft)

ลักษณะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาคู่ ดังรูปที่ 3.4 เพลาของเครื่องอัดอากาศ กับเพลาที่ใช้ขับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าจะแยกออกจากกัน เครื่องอัดอากาศจะถูกขับโดยกังหันก๊าซแรงดันสูง ซึ่งรับพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนที่ออกจากห้องเผาไหม้โดยตรง ส่วนเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าจะถูกขับโดยกังหันก๊าซแรงดันต่ำ ซึ่งรับพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนที่ไหลผ่านกังหันก๊าซแรงดันสูง และในการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าจะควบคุมด้วยบานควบคุมขาเข้า (Inlet Vane) ที่ติดตั้งอยู่ระหว่างกังหันก๊าซแรงดันสูงกับกังหันก๊าซแรงดันต่ำ

สรุปข้อดีและข้อเสียเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาเดี่ยวและแบบเพลาคู่ ดังนี้(http://www.energythai.net/powerplant/gas_turbined.html, 2003)

- ที่สภาวะการจ่ายโหลดต่ำเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาคู่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาเดี่ยว
- ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาคู่มีค่าน้อยกว่าเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาเดี่ยว
- การควบคุมความเร็วของเครื่องอัดอากาศและเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเพลาคู่สามารถดำเนินการได้เป็นอิสระต่อกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.4 สมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

การบ่งบอกคุณลักษณะเชิงสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้น จะต้องอ้างอิงกับสภาวะแวดล้อมที่ตั้ง ซึ่งแต่ละพื้นที่จะมีสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อให้การบอกคุณลักษณะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้เป็นไปในแนวทางเดียวกันหรืออยู่บนฐานอ้างอิงเดียวกัน จึงได้มีการกำหนดสภาวะมาตรฐานเพื่อใช้ในการอ้างอิงขึ้นมา ซึ่งสภาวะมาตรฐานที่นิยมใช้อ้างอิงกันมากที่สุดคือ องค์กรมาตรฐานสากล (International Standard Organization, ISO) แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงมาตรฐานสภาวะแวดล้อมสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

สภาวะแวดล้อม	มาตรฐาน			
	CIMAC	ASME	NEMA	ISO
อุณหภูมิ (°C)	15	26.67	26.67	15
ความดันบรรยากาศ (kPa)	101.30	97.70	101.36	101.36
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	60	50	-	75
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (°C)	15	-	-	-

หมายเหตุ : CIMAC = The International Council on Combustion Engines

ASME = The American Society of Mechanical Engineers

NEMA = National Electrical Manufacturers Association

ISO = International Standard Organization

3.4.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซมีอยู่หลายปัจจัย (Frank J. Brooks, 2000) แต่ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ คือ อุณหภูมิของอากาศสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศก็จะส่งผลให้ความหนาแน่นของอากาศเปลี่ยนตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ และคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ต่างๆ เช่น อัตราส่วนการอัด ประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมของกังหันก๊าซ และนอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ได้แก่ ความดันบรรยากาศ ความดันอากาศตกคร่อมอุปกรณ์ด้านขาเข้าเครื่องอัดอากาศ ความดันไอเสียตกคร่อมอุปกรณ์ด้านขาออกจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ อุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ ความชื้นอากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศและการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ระบบกังหันก๊าซ เป็นต้น ซึ่งผลของปัจจัยต่างๆ สามารถอธิบายโดยสังเขป ได้ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.4.1.1 ความดันบรรยากาศ

ค่าความดันบรรยากาศบนพื้นผิวโลกในแต่ละพื้นที่จะมีค่าไม่เท่ากันและจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การเปลี่ยนแปลงค่าความดันบรรยากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศและระดับความสูง ซึ่งความสูงที่ระดับน้ำทะเลค่าความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ 1.013 บาร์ เมื่อทำการวัดค่าความดันบรรยากาศที่ระดับความสูงมากกว่าระดับน้ำทะเล (Altitude & Barometric Pressure, 2003) จะพบว่าค่าความดันบรรยากาศจะมีค่าลดลงตามระดับความสูงที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งการลดลงของค่าความดันบรรยากาศจะส่งผลให้ความหนาแน่นของอากาศลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้จะมีผลกระทบกับเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศเป็นส่วนประกอบในการเผาไหม้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นอากาศจะทำให้ค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่ออากาศเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ในกรณีของเครื่องยนต์กังหันก๊าซเมื่อความหนาแน่นของอากาศลดลงจะทำให้กำลังผลิตของเครื่องยนต์กังหันก๊าซลดลง เครื่องมือวัดความดันบรรยากาศแสดงดังรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความดันบรรยากาศที่ระดับความสูงต่างๆ

(http://www.sablesys.com/baro-altitude.html , 2004)

Barometric Pressure vs Altitude			
Altitude Above Sea Level (m)	Temperature (°C)	Barometer (mm.Hg. Abs)	Atmospheric Pressure (kPa.Abs)
0	15	760.0	101.33
305	13	733.0	97.63
610	11	706.6	94.19
915	9	681.2	90.81
1,220	7	656.3	87.49
1,526	5	632.5	84.33
2,136	1	586.7	78.19
2,746	-3	543.3	72.40
4,577	-14	429.0	57.16

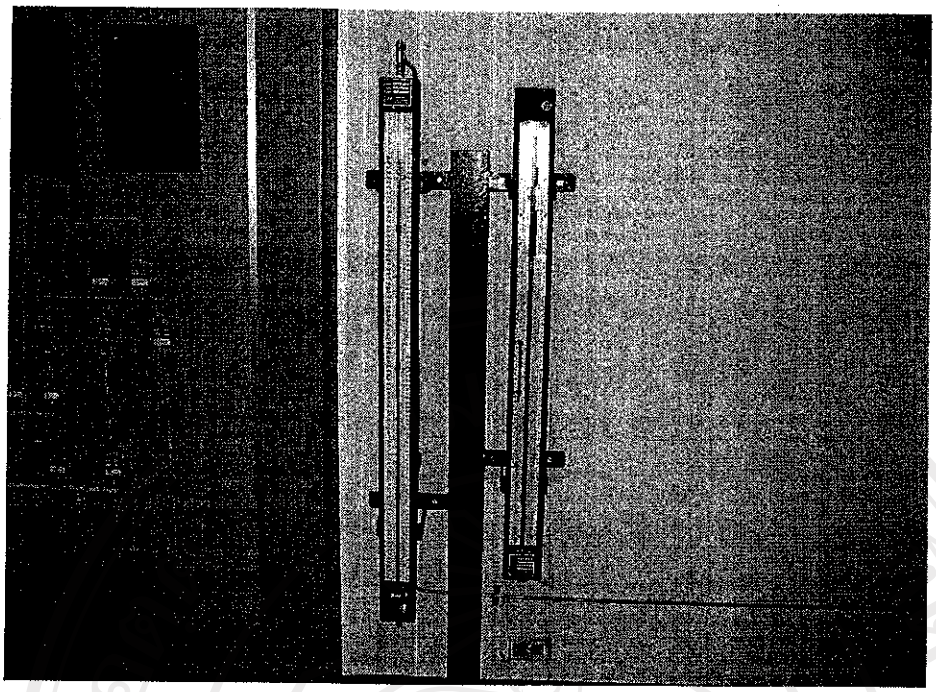
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความหนาแน่นอากาศที่ระดับความสูงต่างๆ

(http://www.coolingzone.com, 2003)

Altitude (m)	Temperature (K)	Pressure (Pa)	Density (kg/m^3)
-500	291.41	107,508	1.2854
0	288.16	101,350	1.2255
500	284.91	95,480	1.1677
1,000	281.66	89,889	1.112
1,500	278.41	84,565	1.0583
2,000	275.16	79,500	1.0067
2,500	271.91	74,684	0.957
3,000	268.66	70,107	0.9092
3,500	265.41	65,759	0.8633
4,000	262.16	61,633	0.8191
4,500	258.91	57,718	0.7768
5,000	255.66	54,008	0.7361

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



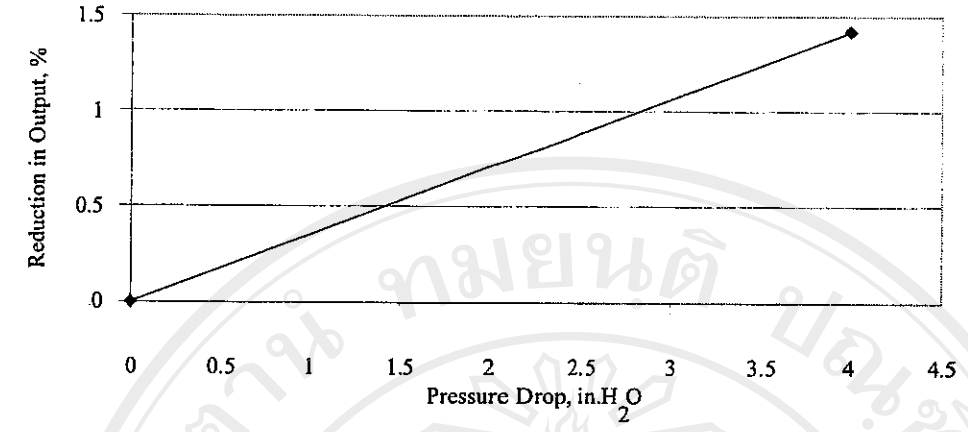
รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องวัดความดันบรรยากาศ

3.4.1.2 ความดันอากาศตกคร่อมอุปกรณ์ด้านขาเข้าเครื่องอัดอากาศ

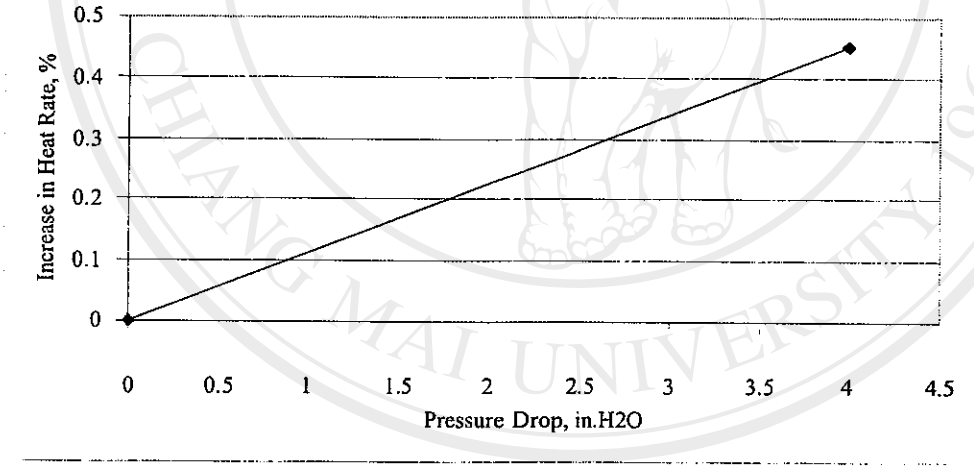
การอุดตันของอุปกรณ์ทางด้านเข้าของเครื่องอัดอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 เช่น เครื่องกรองอากาศ เครื่องดักเก็บเสียง เป็นต้น ทำให้ความดันทางด้านเข้าเครื่องอัดอากาศลดลง ส่งผลกระทบให้กำลังผลิตของเครื่องยนต์กังหันก๊าซลดลง จากการศึกษาของบริษัท GE (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) พบว่า ที่ความดันตกคร่อมด้านเข้าเครื่องอัดอากาศเท่ากับ 4 in.H_2O (0.009 Bar) จะทำให้กำลังผลิตของเครื่องยนต์กังหันก๊าซลดลง 1.42% แสดงดังรูปที่ 3.6 และทำให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิตเพิ่มขึ้น 0.45% แสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งสาเหตุที่ทำให้กำลังผลิตลดลงและอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิตเพิ่มขึ้น มีอยู่ 2 ประการ ดังนี้

- มวลของอากาศที่ไหลเข้าเครื่องอัดอากาศลดลง
- ความดันทางด้านออกของเครื่องอัดอากาศลดลง ทำให้อัตราส่วนความดันของกังหันก๊าซลดลง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง ส่งผลให้กำลังผลิตลดลงและอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิตเพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

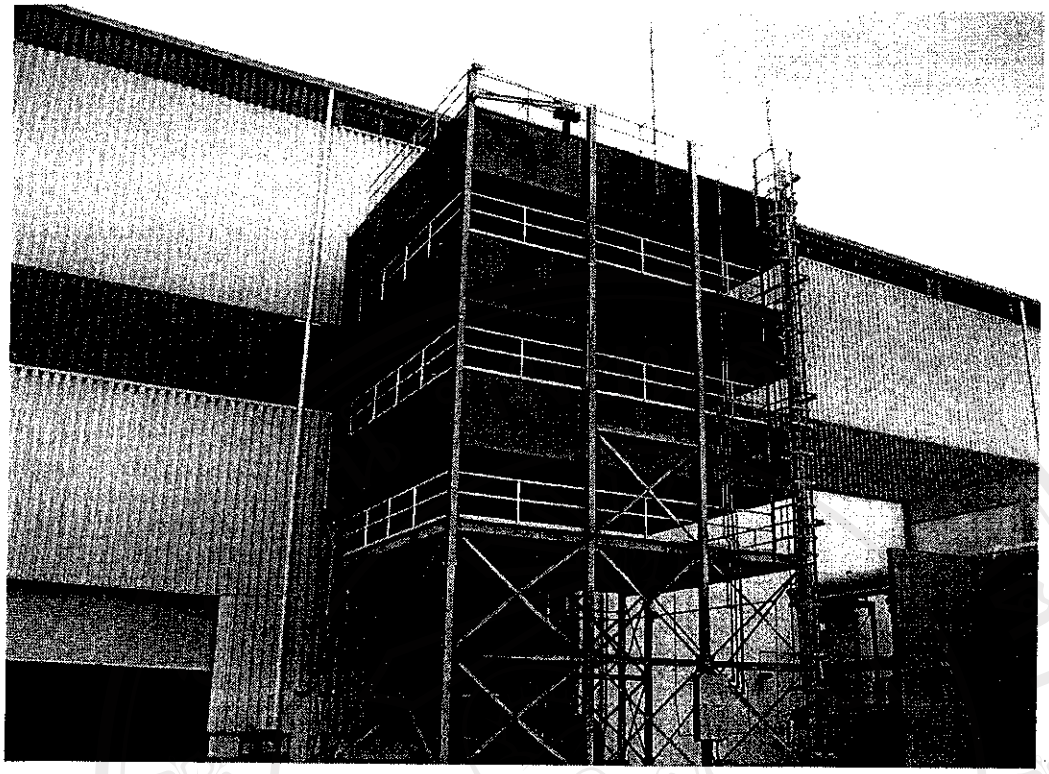


รูปที่ 3.6 แสดงผลกระทบของความดันตกคร่อมด้านเข้าต่อกำลังผลิต (Frank J. Brooks, 2000)

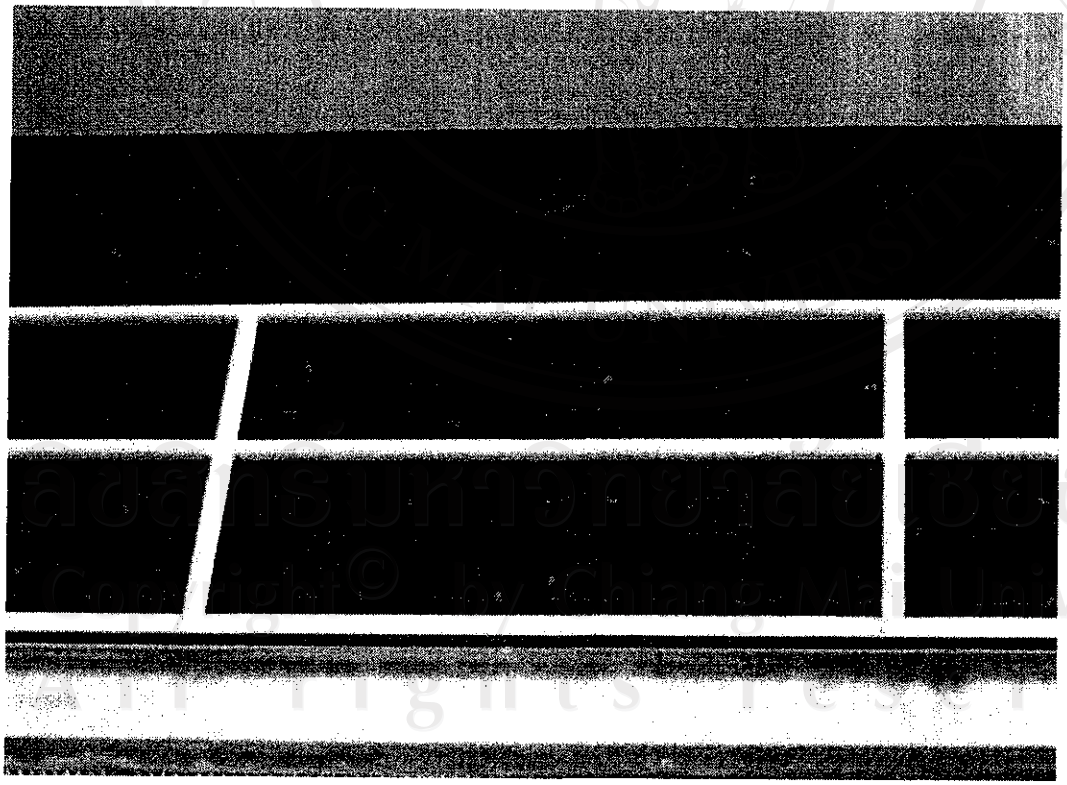


รูปที่ 3.7 แสดงผลกระทบของความดันตกคร่อมด้านเข้าต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิต (Frank J. Brooks, 2000)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.8 แสดงอาคารเครื่องกรองอากาศด้านเข้า

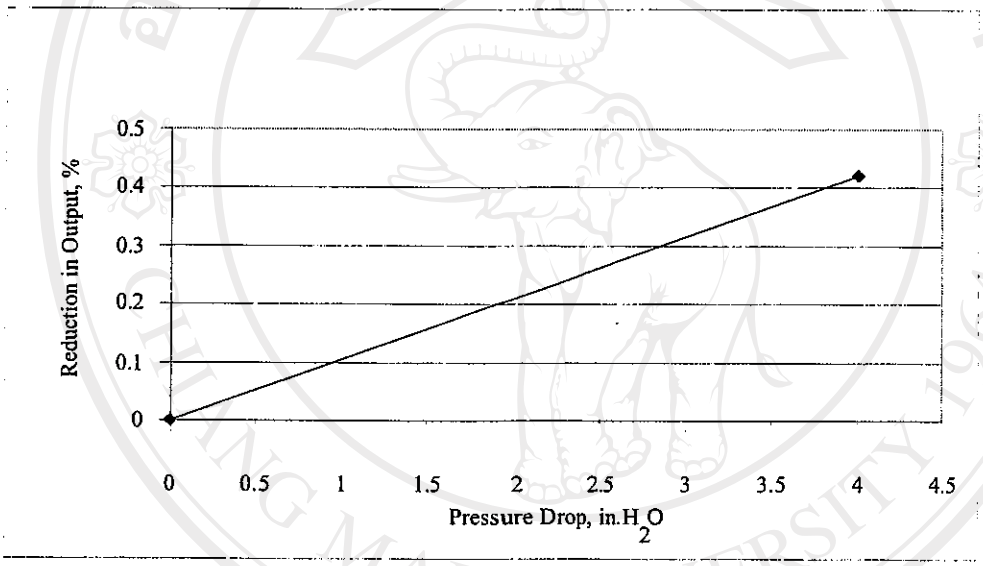


รูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งเครื่องกรองอากาศภายในอาคารเครื่องกรองอากาศ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

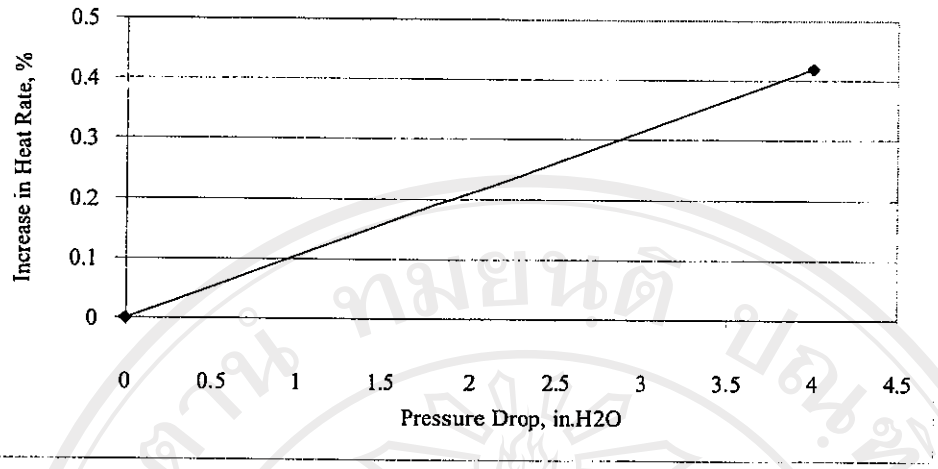
3.4.1.3 ความดันไอเสียตกคร่อมอุปกรณ์ด้านขาออกจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

การอุดตันของอุปกรณ์ทางด้านออกของระบบกังหันก๊าซ ดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 เช่น หม้อต้มไอน้ำ เครื่องดักเก็บเสียง และระบบท่อต่างๆ เป็นต้น จะทำให้เกิดความดันย้อนกลับทางด้านออกของระบบกังหันก๊าซ ซึ่งความดันแตกต่างระหว่าง ความดันย้อนกลับและความดันบรรยากาศ เรียกว่า ความดันตกคร่อมด้านออก ผลกระทบของความดันตกคร่อมด้านออกที่มีต่อเครื่องยนต์กังหันก๊าซ คือ เมื่อความดันตกคร่อมด้านออกเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบกังหันก๊าซลดลง ส่งผลให้กำลังผลิตลดลงและอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิตเพิ่มขึ้น จากการศึกษาของบริษัท GE (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) พบว่า ที่ความดันตกคร่อมด้านออกของระบบกังหันก๊าซ เท่ากับ 4 in.H_2O (0.009 Bar) จะทำให้กำลังผลิตของเครื่องยนต์กังหันก๊าซลดลง 0.42% ดังรูปที่ 3.10 และทำให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิตเพิ่มขึ้น 0.42% ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 แสดงผลกระทบของความดันตกคร่อมด้านออกต่อกำลังผลิต (Frank J. Brooks, 2000)

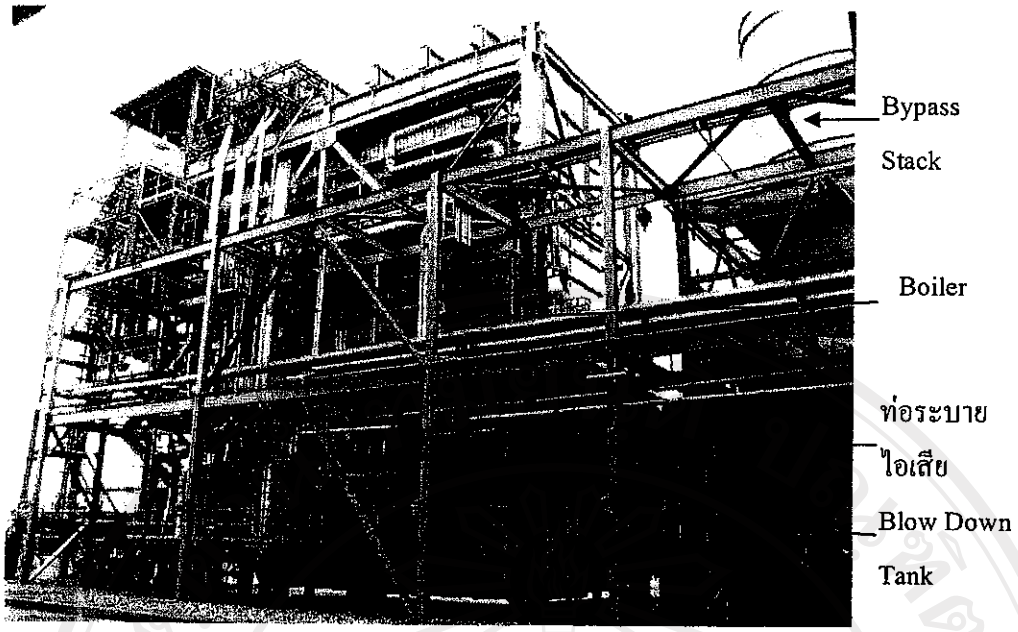
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.11 แสดงผลกระทบของความดันตกคร่อมด้านออกต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิต (Frank J. Brooks, 2000)

รูปที่ 3.12 แสดงท่อระบายไอเสียออกจากระบบกังหันก๊าซติดตั้งที่ด้านนอกอาคารโรงไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

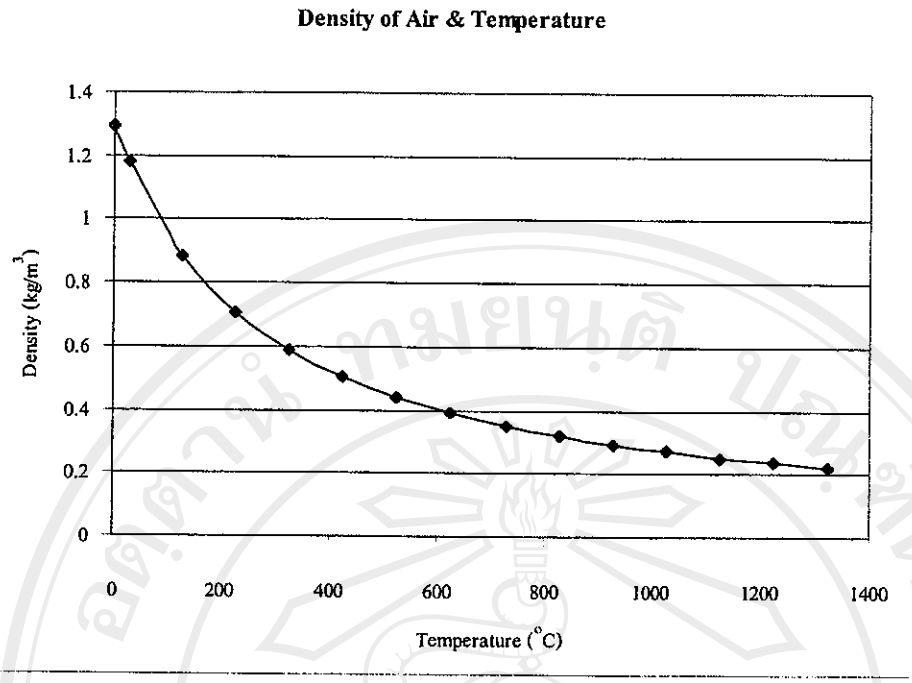


รูปที่ 3.13 แสดงหม้อต้มไอน้ำที่ติดตั้งเชื่อมต่อกับท่อระบายไอเสียของระบบกังหันก๊าซ

3.4.1.4 อุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศจะส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของอากาศ แสดงตามรูปที่ 3.14 คือเมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น ปริมาตรอากาศก็จะเพิ่มขึ้นตาม ทำให้ความหนาแน่นของอากาศลดลง และในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิอากาศลดลง ปริมาตรอากาศก็จะลดลงตาม ส่งผลให้ความหนาแน่นของอากาศเพิ่มขึ้น ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซอุณหภูมิอากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญ ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซมากที่สุด เนื่องจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศเป็นส่วนประกอบหลักในการเผาไหม้ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของอากาศลดลง ส่งผลให้มวลของอากาศที่ไหลเข้าเครื่องอัดอากาศลดลง ทำให้ค่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คืออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะลดลง ทำให้กำลังผลิตของเครื่องยนต์กังหันก๊าซลดลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

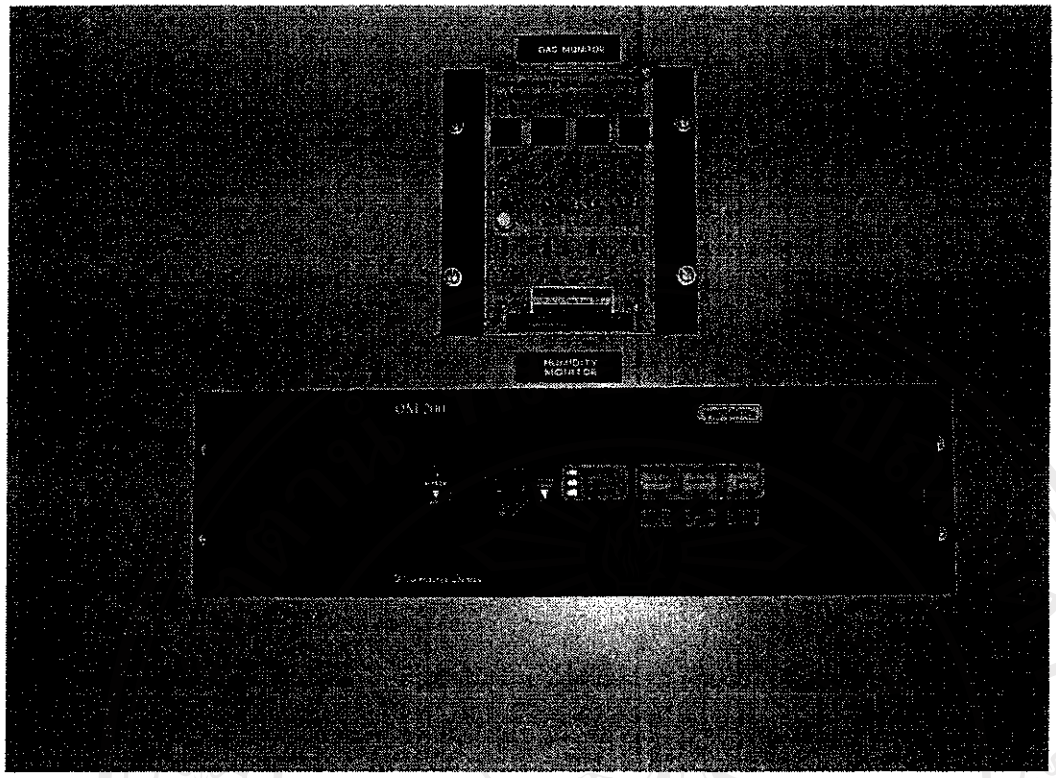


รูปที่ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิอากาศ
(http://users.wpi.edu/~ierardi/PDF/air_density_plot.PDF, 2004)

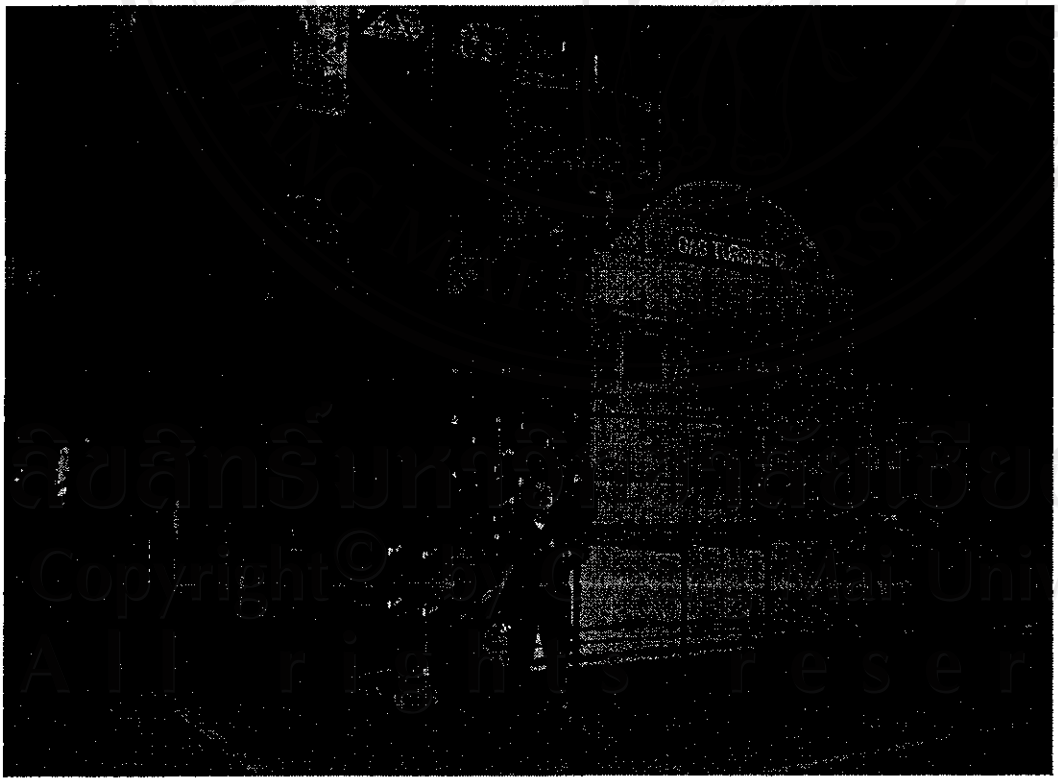
3.4.1.5 ความชื้นอากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศ

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่ง ณ สภาวะดังกล่าว อากาศจะมีความหนาแน่นอยู่ค่าๆหนึ่ง และที่สภาวะดังกล่าวนั้นเมื่ออากาศมีไอน้ำเข้ามาเป็นส่วนประกอบ จะทำให้ค่าความหนาแน่นของอากาศที่สภาวะดังกล่าวลดลง (Jack Williams, 2004) สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากโมเลกุลของออกซิเจนหรือไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศ ณ สภาวะดังกล่าว จะถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลของไอน้ำซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่า จึงทำให้ความหนาแน่นของอากาศชื้นมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของอากาศแห้ง ดังนั้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความหนาแน่นของอากาศลดลง และส่งผลให้มวลของอากาศที่ส่งเข้าห้องเผาไหม้ลดลงตามไปด้วย ทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซลดลง เครื่องมือวัดความชื้นอากาศแสดงดังรูปที่ 3.15

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.15 แสดงเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ



รูปที่ 3.16 แสดงเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.4.1.6 การเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน

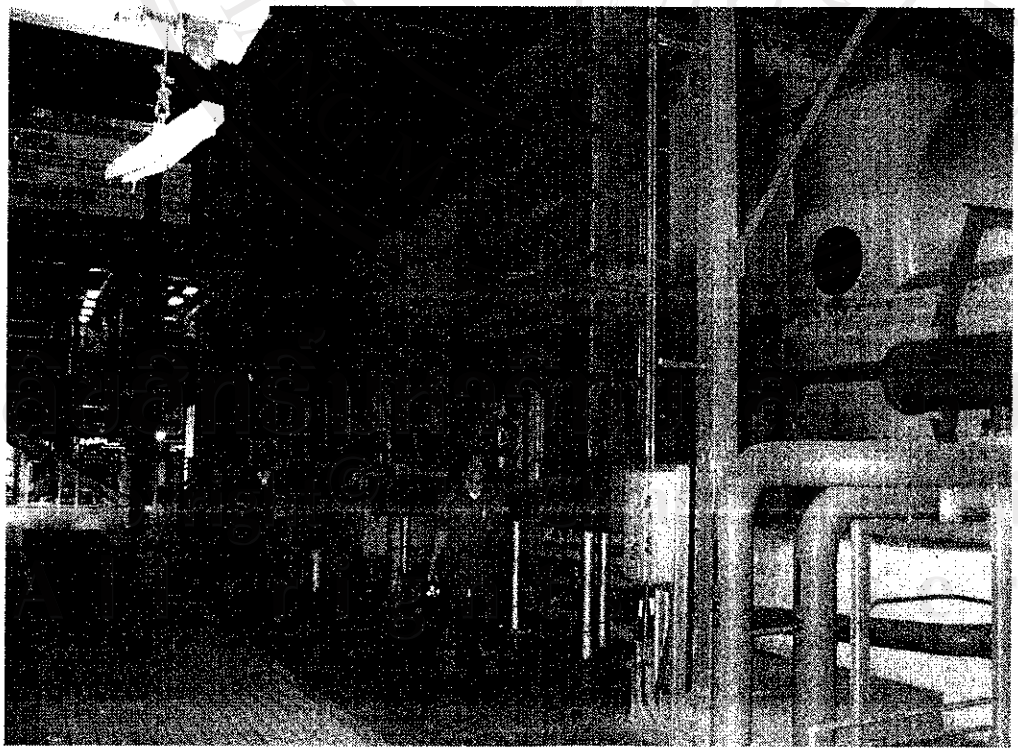
การลดลงของสมรรถนะเครื่องยนต์กังหันก๊าซส่วนหนึ่งจะเกิดจากการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ตามอายุการใช้งาน ซึ่งการเสื่อมสภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- การสูญเสียที่สามารถแก้ไขกลับคืนได้ด้วยวิธีการจัดการด้านเดินเครื่อง

การสูญเสียที่สามารถแก้ไขกลับคืนได้ด้วยวิธีการเดินเครื่องนั้น ในส่วนของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ดังรูปที่ 3.16 และ 3.17 จะเน้นที่กรณี เครื่องอัดอากาศสกปรก ซึ่งสามารถแก้ไขกลับคืนได้โดยการทำความสะอาดเครื่องอัดอากาศตามระยะเวลาที่เหมาะสม เช่น การล้างด้วยน้ำยาเคมี การใช้คนเข้าไปทำความสะอาดใบพัด เป็นต้น

- การสูญเสียที่ไม่สามารถแก้ไขกลับคืนได้ด้วยวิธีการจัดการด้านเดินเครื่อง

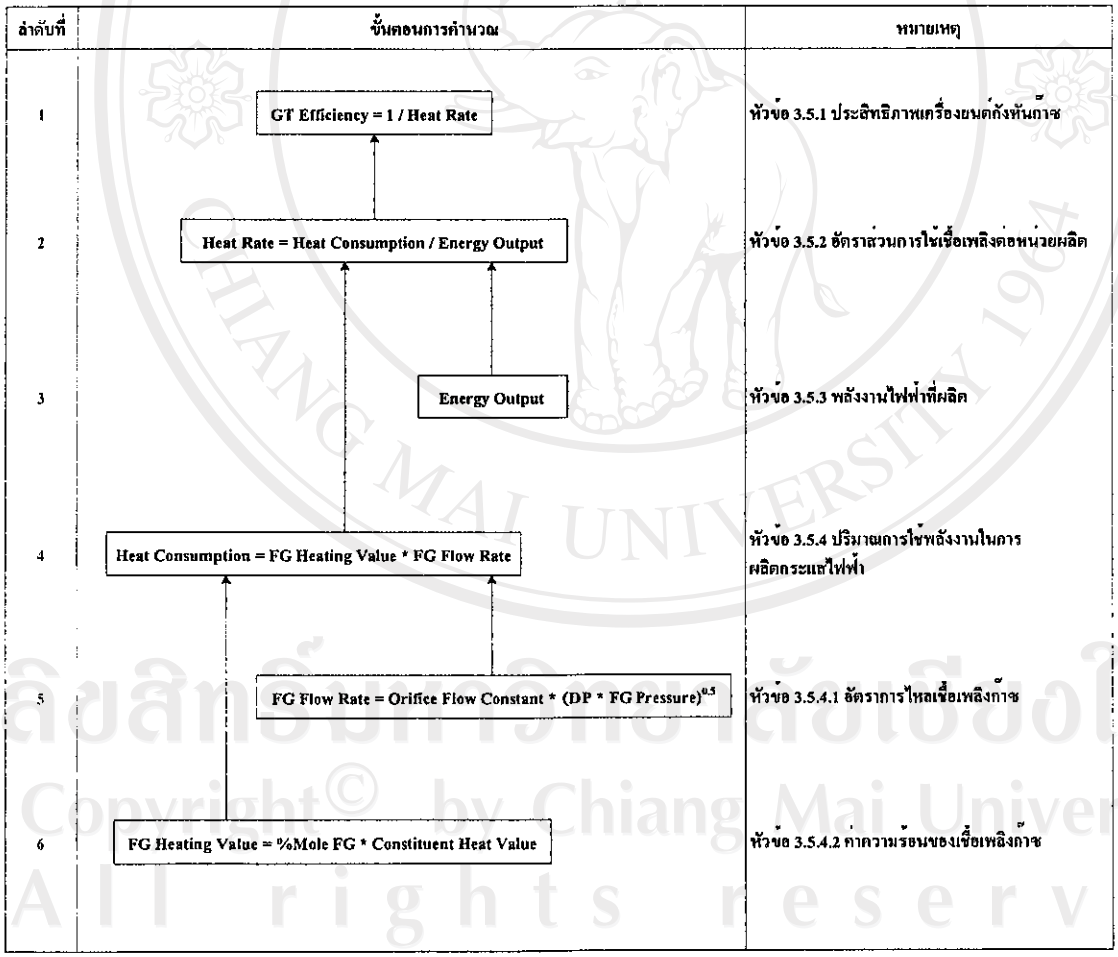
การสูญเสียที่ไม่สามารถแก้ไขกลับคืนได้ด้วยวิธีการเดินเครื่องนั้น จะเป็นการสูญเสียที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ เช่น ใบพัดของเครื่องอัดอากาศเกิดการกัดกร่อน ช่องว่างระหว่างปลายใบพัดเครื่องอัดอากาศกับฝาครอบห่างเพิ่มขึ้น เป็นต้น ซึ่งการสูญเสียเหล่านี้จะแก้ไขได้เมื่อมีการหยุดเครื่องเพื่อบำรุงรักษาเท่านั้น จากการศึกษาของบริษัท GE (Frank J. Brooks, 2000) พบว่า จากการใช้งานเครื่องยนต์กังหันก๊าซนาน 24,000 ชั่วโมง โดยไม่มีการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เกิดความเสียหาย ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะลดลงประมาณ 2 – 6% แต่ถ้ามีการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เกิดความเสียหาย ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะลดลงประมาณ 1 – 1.5%



รูปที่ 3.17 แสดงท่อระบายไอเสียที่ต่อจากด้านออกเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

3.5 การคำนวณหาค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

ในการคำนวณหาค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซตามรูปที่ 3.18 นั้น จะต้องมีการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานและมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ซึ่งข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณหาค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่สภาวะการเดินเครื่องจริง ประกอบด้วย ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิอากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศ ความดันและอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องอัดอากาศ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ความดันและอุณหภูมิของไอเสีย จำนวนรอบการหมุนกังหันก๊าซ และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ เป็นต้น ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ซึ่งได้ทำการตรวจวัด ณ เงื่อนไขการเดินเครื่องที่แตกต่างกันนั้น จะต้องทำการปรับแก้ผลการคำนวณที่แสดงถึงค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ไปที่สภาวะอ้างอิงเดียวกันก่อนจึงจะทำการเปรียบเทียบได้ เช่น ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ค่าอัตราส่วนการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิต และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวม เป็นต้น ซึ่งการปรับแก้ค่าผลการคำนวณสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซทำได้โดยการใช้ค่าแฟคเตอร์ปรับแก้ที่ผู้ผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซกำหนดมาให้



รูปที่ 3.18 แสดงขั้นตอนการคำนวณค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.5.1 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ สามารถคำนวณได้จากส่วนกลับของอัตราส่วนการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิต (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) ซึ่งสมการสำหรับใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ คือ

$$\eta_{GT} = \frac{1}{HR} \tag{3-20}$$

เมื่อ

η_{GT} = ประสิทธิภาพเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (%)

HR = อัตราส่วนการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิต (kJ/kWh)

3.5.2 ค่าอัตราส่วนการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

การคำนวณหาค่าอัตราส่วนการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตของเครื่องยนต์กังหันก๊าซจะคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ณ ช่วงระยะเวลาเดียวกัน (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) ซึ่งสมการสำหรับใช้คำนวณค่าอัตราส่วนการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ คือ

$$HR = \frac{HC}{kWh} \tag{3-21}$$

เมื่อ

HR = อัตราส่วนการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิต (kJ/kWh)

HC = ปริมาณการใช้พลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า (kJ)

kWh = พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kWh)

3.5.3 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

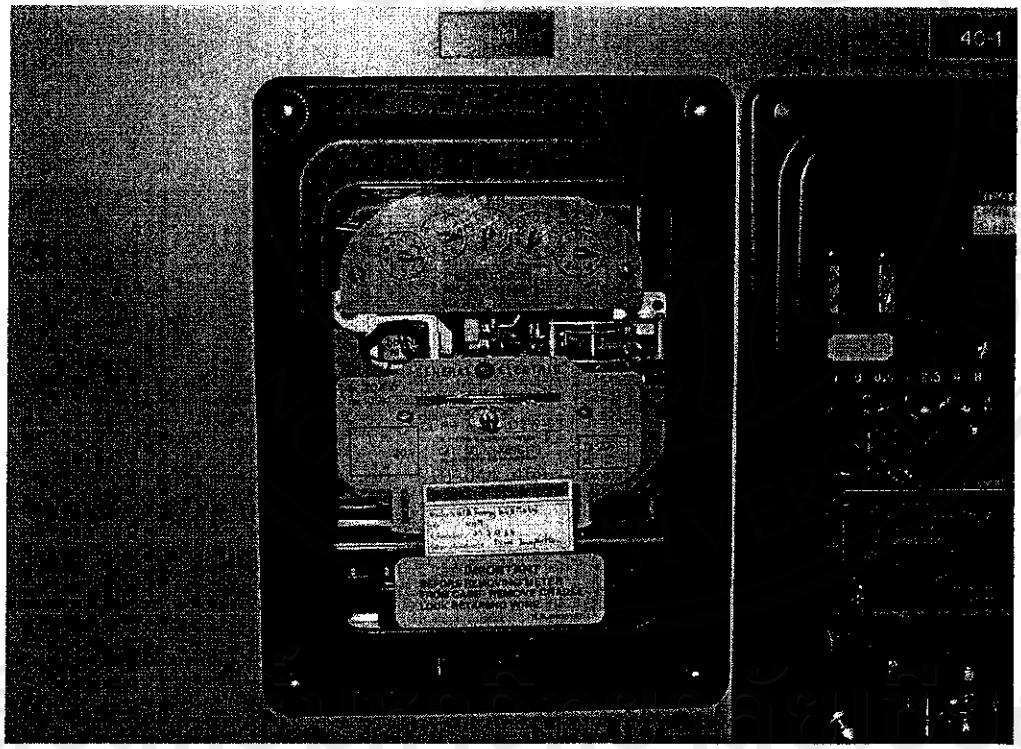
ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ จะตรวจวัดค่าจากมาตรวัดพลังงาน แสดงดังรูปที่ 3.19 สมการสำหรับใช้ในการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายออก คือ

$$kWh = \frac{N}{T} \times Pkh \times 3.6 - \frac{V \times A}{0.93 \times 1,000} \tag{3-22}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

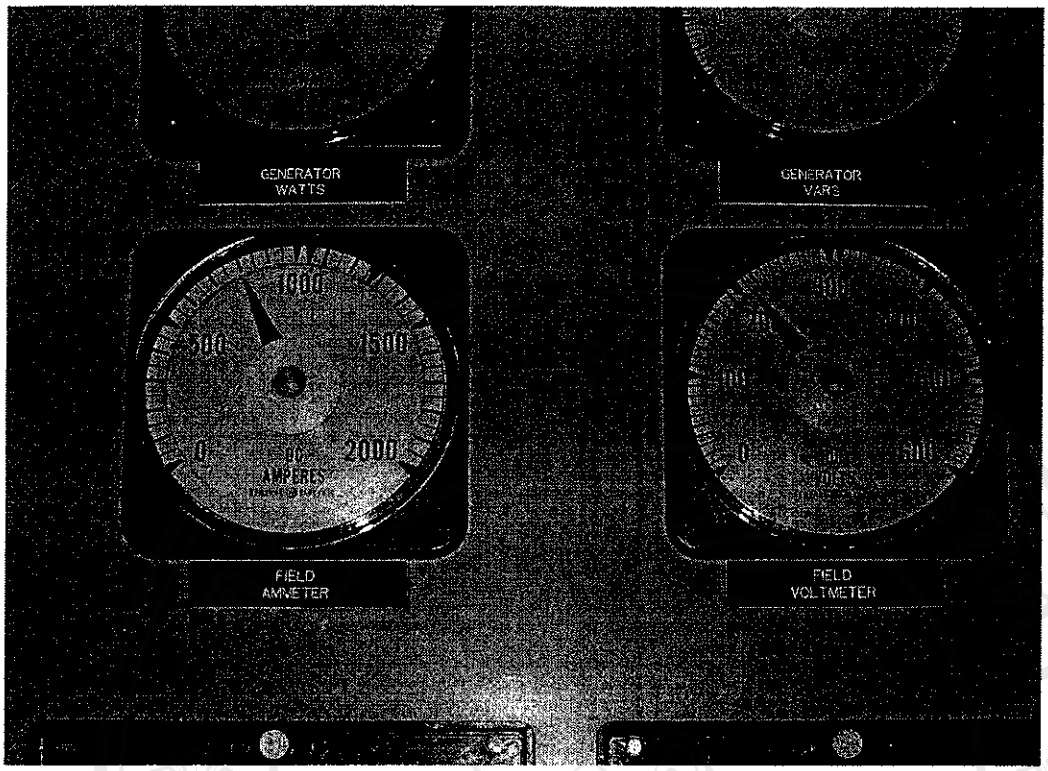
เมื่อ

kWh	=	พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายออกทั้งหมด (kWh)
N	=	จำนวนรอบจานหมุนของมาตรวัดพลังงาน (รอบ)
T	=	เวลาที่ใช้ในการหมุนครบ 20 รอบ (s)
Pkh	=	ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ = 2,400,000 W/rev.
V	=	ค่าแรงดันไฟฟ้าสนาม (V) แสดงดังรูปที่ 3.20
A	=	ค่ากระแสไฟฟ้าสนาม (A) แสดงดังรูปที่ 3.20
3.6	=	(3,600 second/hour)/(1,000 W/kW)
0.93	=	ค่าปรับแก้การสูญเสียเนื่องจากการแปลงค่า (Factor for losses in conversion elements)



รูปที่ 3.19 แสดงมาตรวัดพลังงานไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.20 แสดงมาตรวัดแรงดันสนามและกระแสไฟฟ้าสนาม

3.5.4 ค่าปริมาณการใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า

ปริมาณการใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า คำนวณได้จากอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงคูณกับค่าความร้อนเชื้อเพลิงสุทธิ (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) ซึ่งสมการสำหรับใช้ในการคำนวณค่าปริมาณการใช้พลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า คือ

$$HC = 0.02832 \times m_{fSI} \times LHV_{rSI} \quad (3\text{-}23)$$

เมื่อ

HC = ปริมาณการใช้ความร้อน (kJ/h)

m_{fSI} = อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/h)

LHV_{rSI} = ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสุทธิ (kJ/kg)

3.5.5 ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

ในการคำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของเครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้น มีวิธีการคำนวณอยู่หลายวิธีแต่ในการศึกษาครั้งนี้จะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ครั้งนี้จะใช้วิธี Pipe Tap Orifice Metering (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) แสดงดังรูปที่3.21 สาเหตุที่ต้องใช้วิธีดังกล่าวเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดค่าความดันตกคร่อมของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติเป็นแบบออริฟิส (Orifice) และในการคำนวณตามวิธีดังกล่าวข้างต้นจะต้องใช้หน่วยวัดเป็นแบบอังกฤษทั้งหมด และผลการคำนวณค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงก๊าซที่ได้จะแสดงในหน่วยปริมาตรต่อเวลา ดังนั้นก่อนนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซจะต้องทำการเปลี่ยนจากค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรไปเป็นค่าอัตราการไหลเชิงมวลเสียก่อนสมการที่ใช้ในการคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$m_{fV} = F_b \times F_r \times Y \times F_{pb} \times F_{tb} \times F_{tf} \times F_{pv} \times F_g \times \sqrt{h_w P_f} \qquad (3\text{-}24)$$

เมื่อ

m_{fV} = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (ft^3/h)

F_b = ค่าแฟคเตอร์เบสิคออริฟิส (Basic Orifice Factor)

F_r = ค่าแฟคเตอร์เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number Factor)

Y = ค่าแฟคเตอร์การขยายตัวอ้างอิงจุดวัดความดันสแตติคด้านต้นทาง (Expansion Factor Based On Upstream Static Pressure)

F_{pb} = ค่าแฟคเตอร์ความดันอ้างอิง (Pressure Base Factor)

F_{tb} = ค่าแฟคเตอร์อุณหภูมิอ้างอิง (Temperature Base Factor)

F_{tf} = ค่าแฟคเตอร์อุณหภูมิก๊าซที่ไหล (Flowing Temperature Factor)

F_{pv} = ค่าแฟคเตอร์ซุปเปอร์คอมเพรสสิบิลิตี้ (Supercompressibility Factor)

F_g = ค่าแฟคเตอร์ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density Factor)

h_w = ค่าความดันตกคร่อมออริฟิส ($in.H_2O$)

P_f = ค่าความดันสแตติค (Psia)

จากสมการที่ (3-24) พบว่าสมการดังกล่าวประกอบไปด้วยค่าแฟคเตอร์ต่างๆ ซึ่งมีสมการในการคำนวณแตกต่างกันออกไป ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.5.5.1 ค่าแฟคเตอร์เบสิคออริฟิส (Basic Orifice Factor, F_b) สมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$F_b = 338.178 \times d^2 \times K_V \tag{3-25}$$

เมื่อ

K_V = ค่าสัมประสิทธิ์ด้านขาออก สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่เป็นอินฟินิตี้

d = เส้นผ่าศูนย์กลางออริฟิส (Orifice Diameter, inch)

จากสมการ (3-25) จะต้องมีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ด้านขาออก (Coefficients of Discharge) ซึ่งสมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$K_V = \frac{K_e}{1 + \frac{15E}{1{,}000{,}000d}} \tag{3-26}$$

เมื่อ

K_e = ค่าสัมประสิทธิ์ด้านขาออกเมื่อค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์เท่ากับ (1,000,000d)/15

จากสมการ (3-26) จะต้องทำการคำนวณหาค่า K_e ซึ่งสมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

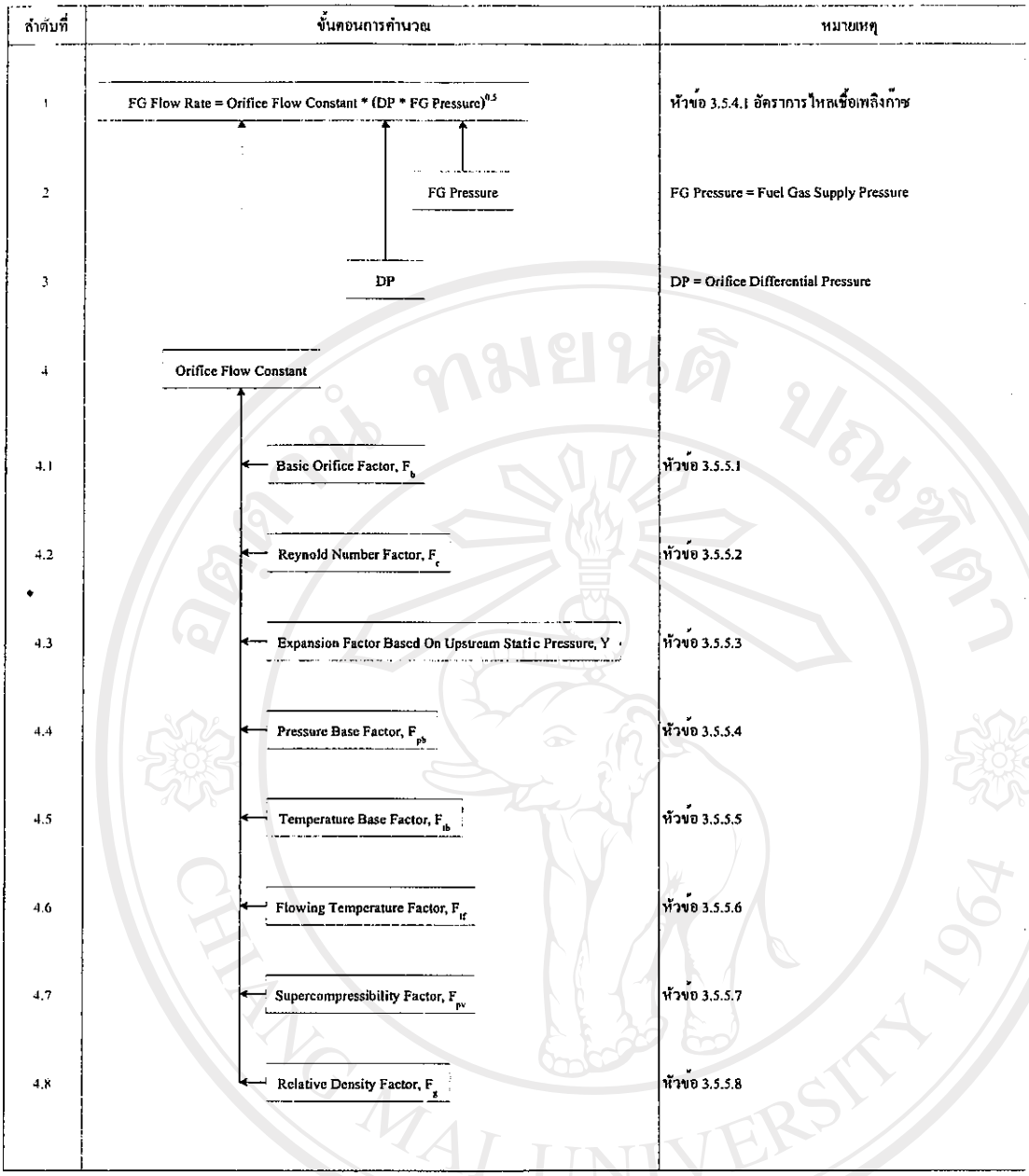
$$K_e = 0.5993 + \frac{0.007}{D} + (0.364 - \frac{0.076}{\sqrt{D}}) \times \beta^4 + (0.4 \times (1.6 - \frac{1}{D})^5 \times ((0.07 + \frac{0.5}{D}) - \beta^{2.5})) - (0.009 + \frac{0.34}{D}) \times (0.5 - \beta)^{1.5} + (\frac{65}{D^2} + 3) \times (\beta - 0.7)^{2.5} \tag{3-27}$$

เมื่อ

β = อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อก๊าซ (inch)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.21 แสดงขั้นตอนการคำนวณค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

จากสมการ (3-27) ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter Ratio) จะคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางออริฟิสต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อส่งเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ ไม่มีหน่วยวัด สมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$\beta = \frac{d}{D} \qquad (3\text{-}28)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ

β = อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง

D = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อก๊าซ (inch)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางออริฟิส (inch)

ในสมการ (3-26) นอกจากจะต้องคำนวณหาค่า K_e ตามสมการ (3-27) แล้ว ยังมีอีกแฟคเตอร์ที่จะต้องคำนวณหาคือค่า E สมการสำหรับคำนวณ คือ

$$E = d \times (830 - 5000 \times \beta + 9000 \times \beta^2 - 4200 \times \beta^3 + B) \quad (3\text{-}29)$$

เมื่อ

$$B = \frac{530}{\sqrt{D}} \quad (3\text{-}30)$$

3.5.5.2 การคำนวณค่าแฟคเตอร์เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number Factor) สมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$F_r = 1 + \frac{b}{\sqrt{h_W \times P_f}} \quad (3\text{-}31)$$

เมื่อ

$$b = \frac{E}{12{,}835 \times d \times K} \quad (3\text{-}32)$$

K = ประมาณค่าจากตารางที่ 3.4

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 3.4 แสดงค่า K สำหรับใช้ในการคำนวณค่าแฟคเตอร์ Fr (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992)

β	K (pipe)
0.425	0.692
0.450	0.707
0.475	0.724
0.500	0.742
0.525	0.763
0.550	0.785
0.575	0.810
0.600	0.837
0.625	0.869
0.650	0.904
0.675	0.943
0.700	0.988

3.5.5.3 ค่าแฟคเตอร์การขยายตัวอ้างอิงจุดวัดความดันสแตติคด้านต้นทาง (Expansion Factor Based On Upstream Static Pressure) สมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$Y = 1 - (0.41 + 0.35 \times \beta^4) \times \frac{X_1}{k} \qquad (3\text{-}33)$$

เมื่อ

Y = ค่าแฟคเตอร์การขยายตัวอ้างอิงจุดวัดความดันสแตติคด้านต้นทาง

k = ค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ เท่ากับ 1.3

จากสมการ (3-33) ค่าแฟคเตอร์ X_1 คำนวณค่าได้จากสมการ (3-34) (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$X_1 = \frac{h_w}{27.707 \times P_{f1}} \quad (3\text{-}34)$$

เมื่อ

h_w = ค่าความดันตกคร่อมออริฟิส ($in.H_2O$)

P_f = ค่าความดันสแตติค (Psia)

3.5.5.4 ค่าแฟคเตอร์ความดันอ้างอิง (Base Pressure Factor) เป็นแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้ค่าความดันที่กำหนดตามสัญญาไปที่ค่าความดันสัมบูรณ์อ้างอิงแสดงในรูปอัตราส่วนระหว่างค่าความดันสัมบูรณ์อ้างอิง คือ 14.73 Psia ต่อค่าความดันสัมบูรณ์ที่กำหนดตามสัญญา ซึ่งสมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$F_{pb} = \frac{14.73}{P_b} \quad (3\text{-}35)$$

เมื่อ

P_b = ความดันสัมบูรณ์ที่กำหนดตามสัญญา (Contract Absolute Base Pressure , Psia)

3.5.5.5 ค่าแฟคเตอร์อุณหภูมิอ้างอิง (Temperature Base Factor) เป็นแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิสัมบูรณ์ที่กำหนดตามสัญญามากกว่า 519.67 °R (15.5 °C) ซึ่งแสดงในรูปอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิสัมบูรณ์ที่กำหนดตามสัญญาต่ออุณหภูมิสัมบูรณ์ที่สภาวะอ้างอิง คือ 519.67 °R (15.5 °C) ซึ่งสมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$F_{tb} = \frac{T_b}{519.67} \quad (3\text{-}36)$$

เมื่อ

T_b = อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่กำหนดตามสัญญา (Contract Absolute Base Temperature , °R)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.5.5.6 ค่าแฟคเตอร์อุณหภูมิก๊าซที่ไหล (Flowing Temperature Factor) เป็นค่าแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้ค่าอุณหภูมิของก๊าซที่ไหลที่สภาวะสมมติ คือ 519.67 °R (15.5 °C) ไปที่อุณหภูมิของก๊าซที่ไหลที่สภาวะจริง สมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$F_{tf} = \sqrt{\frac{519.67}{T_f}} \tag{3-37}$$

เมื่อ T_f = อุณหภูมิของก๊าซที่ไหลที่สภาวะจริง (Actual Flowing Temperature , °R)

3.5.5.7 ค่าแฟคเตอร์ซุปเปอร์คอมเพรสสิบิลิตี้ (Supercompressibility Factor) เป็นค่ารากที่สองของค่าคอมเพรสสิบิลิตี้ที่สภาวะอ้างอิงต่อค่าคอมเพรสสิบิลิตี้ที่สภาวะการไหลจริงของก๊าซ ซึ่งสมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$F_{pv} = \sqrt{\frac{Z_b}{Z_{fl}}} \tag{3-38}$$

เมื่อ

Z_b = Gas Compressibility At Base Condition, (P_b , T_b)

Z_{fl} = Gas Compressibility At Upstream Flowing Condition, (P_{fl} , T_f)

3.5.5.8 ค่าแฟคเตอร์ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density Factor) เป็นค่าเทียบเท่าสำหรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ 1.0 ไปเป็นค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของก๊าซจริง ซึ่งสมการสำหรับคำนวณ (Manual of Petroleum Measurement Standard, 1992) คือ

$$F_g = \sqrt{\frac{1}{G_r}} \tag{3-39}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ

G_r = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของก๊าซจริง (Real Gas Relative Density)

3.5.6 ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ สามารถหาค่าได้โดยใช้ค่าปริมาตรจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซคูณกับค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงก๊าซสมการที่ใช้ในการคำนวณ (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) คือ

$$m_f = \frac{m_{fV}}{SV_r} \tag{3-40}$$

เมื่อ

m_f = ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (lbm/h)

m_{fV} = ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (ft^3/h)

SV_r = ค่าปริมาตรจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซ (ft^3/lbm)

เนื่องจากผลการคำนวณที่ได้จากสมการ (3-40) มีหน่วยวัดเป็นแบบอังกฤษ สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วย SI ได้โดยการคูณผลการคำนวณดังกล่าวด้วยค่าแฟคเตอร์แปลงหน่วย สมการที่ใช้ในการคำนวณ (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) คือ

$$m_{fSI} = m_f \times 0.45359 \tag{3-41}$$

เมื่อ

m_{fSI} = ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (kg/h)

m_f = ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (lbm/h)

3.5.7 ค่าความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

ค่าความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ สามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติคูณกับค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละองค์ประกอบ ในการคำนวณหาค่าดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ธรรมชาติที่สภาวะในอุดมคติ สมการที่ใช้ในการคำนวณ (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) คือ

$$SG_{id} = \sum_{j}^{n} (X_j \times SG_j) \quad (3\text{-}42)$$

เมื่อ

SG_{id} = ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะในอุดมคติ

X_j = เปอร์เซ็นต์โมลของแต่ละองค์ประกอบ (%) แสดงดังตารางที่ 3.5

SG_j = ค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละองค์ประกอบ แสดงดังตารางที่ 3.5

n = จำนวนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

จากสมการ (3-42) เมื่อได้ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะในอุดมคติแล้ว ในขั้นตอนที่ 2 จะนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาค่าที่สภาวะจริง สมการที่ใช้ในการคำนวณ (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) คือ

$$SG_r = \frac{SG_{id}}{Z} \quad (3\text{-}43)$$

เมื่อ

SG_r = ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะจริง

Z = ค่าคอมเพรสสิบิลิตี้แฟคเตอร์

จากสมการ (3-43) สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าคอมเพรสสิบิลิตี้แฟคเตอร์ (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) คือ

$$Z = 1.00369 - (0.0101 \times SG_{id}) + \left[(0.00007) \times \%\text{mole of } N_2 \times \%\text{mole of } CO_2 \right] \quad (3\text{-}44)$$

เมื่อ

Z = ค่าคอมเพรสสิบิลิตี้แฟคเตอร์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

SG_{id} = ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะในอุดมคติ

3.5.8 ค่าปริมาตรจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

ค่าปริมาตรจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ สามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติคูณกับค่าปริมาตรจำเพาะของแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งในการคำนวณหาค่าดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 จะคำนวณหาค่าปริมาตรจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่สภาวะในอุดมคติ สมการที่ใช้ในการคำนวณ (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) คือ

$$SV_{id} = \sum_{j}^{n} (X_j \times SV_j) \qquad (3\text{-}45)$$

เมื่อ

SV_{id} = ค่าปริมาตรจำเพาะที่สภาวะในอุดมคติ

X_j = เปอร์เซ็นต์โมลของแต่ละองค์ประกอบ (%) แสดงดังตารางที่ 3.5

SV_j = ค่าปริมาตรจำเพาะของแต่ละองค์ประกอบ แสดงดังตารางที่ 3.5

n = จำนวนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

จากสมการ (3-45) เมื่อได้ค่าปริมาตรจำเพาะที่สภาวะในอุดมคติแล้ว ในขั้นตอนที่ 2 จะนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาค่าปริมาตรจำเพาะที่สภาวะจริง สมการที่ใช้ในการคำนวณ (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) คือ

$$SV_r = \frac{SV_{id}}{Z} \qquad (3\text{-}46)$$

เมื่อ

SV_r = ค่าปริมาตรจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซที่สภาวะจริง

Z = ค่าคอมเพรสสิบิลิตี้แฟคเตอร์

ตามสมการ (3-46) ค่าคอมเพรสสิบิลิตี้แฟคเตอร์ สามารถคำนวณหาค่าได้โดยใช้สมการ (3-44)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

3.5.9 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ สามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติคูณกับค่าความร้อนของแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งในการคำนวณหาค่าดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 จะคำนวณหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่สภาวะในอุดมคติ สมการที่ใช้ในการคำนวณ (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) คือ

$$LHV_{id} = \sum_{j=1}^{n} (X_j \times h_j) \qquad (3\text{-}47)$$

เมื่อ

LHV_{id} = ค่าความร้อนสุทธิต่อหน่วยปริมาตรที่สภาวะในอุดมคติ (Btu/ft^3)

x_j = เปอร์เซ็นต์โมลของแต่ละองค์ประกอบ (%)แสดงดังตารางที่ 3.5

h_j = ค่าความร้อนสุทธิต่อหน่วยปริมาตรของแต่ละองค์ประกอบ (Btu/ft^3) แสดงดังตารางที่ 3.5

n = จำนวนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

จากสมการ (3-47) เมื่อได้ค่าความร้อนสุทธิที่สภาวะในอุดมคติแล้ว ในขั้นตอนที่ 2 จะนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาค่าความร้อนสุทธิที่สภาวะจริง สมการที่ใช้ในการคำนวณ (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997) คือ

$$LHV_r = \frac{LHV_{id}}{Z} \qquad (3\text{-}48)$$

เมื่อ

LHV_r = ค่าความร้อนสุทธิต่อหน่วยปริมาตรที่สภาวะจริง (Btu/ft^3)

Z = ค่าคอมเพรสสิบิลิตี้แฟคเตอร์

ตามสมการ (3-48) ค่าคอมเพรสสิบิลิตี้แฟคเตอร์ สามารถคำนวณหาค่าได้โดยใช้สมการ (3-44) และเนื่องจากผลการคำนวณค่าความร้อนสุทธิที่ได้จากสมการ (3-48) มีหน่วยวัดเป็นแบบอังกฤษ สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วย SI ได้โดยการใช้ค่าแฟคเตอร์แปลงหน่วย แสดงได้ดังสมการ

$$LHV_{rSI} = 0.47858 \times LHV_r \times SV_r \qquad (3\text{-}49)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ

LHV_{rSI} = ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (kJ/kg)

LHV_r = ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (Btu/ft^3)

SV_r = ค่าปริมาตรจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซ (ft^3/lbm)

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงก๊าซในสภาวะอุดมคติที่ 15 °C 1.013 Bar (Performance Test Code on Gas Turbine, 1997)

Compound	Specific Gravity	Specific Volume (ft^3/lbm)	Low Heat Value (Btu/ft^3)
Methane	0.5539	23.5689	911.2
Ethane	1.0382	12.4924	1621.6
Propane	1.5224	8.4360	2321.4
Isobutane	2.0067	6.3237	3008.0
N-Butane	2.0067	6.3002	3017.5
Isopentane	2.4910	5.2506	3706.4
N-Pentane	2.4910	5.2506	3716.0
Hexanes, Avg	2.9753	4.3960	4405.0
Carbon Dioxide	1.5194	8.5590	-
Nitrogen	0.9672	13.5197	-

3.6 การคำนวณค่ากำลังผลิตกระแสไฟฟ้าปรับแก้

ในการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่สภาวะแตกต่างกันนั้นจะต้องมีการปรับแก้ค่าสมรรถนะที่สภาวะจริง เช่น กำลังผลิตกระแสไฟฟ้า อัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิต เป็นต้น ไปที่สภาวะอ้างอิงใดๆ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะปรับแก้ค่าสมรรถนะที่สภาวะจริงไปที่สภาวะออกแบบ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) ปัจจัยที่จะต้องนำมาใช้ในการปรับแก้ ประกอบด้วย ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ ความชื้นจำเพาะอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศ ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซ ชั่วโมงการใช้งานเครื่องยนต์กังหันก๊าซ เป็นต้น ซึ่งสมการสำหรับใช้คำนวณค่ากำลังผลิตกระแสไฟฟ้าปรับแก้ไปที่สภาวะออกแบบ คือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$kWhc = kWh \times F1_{BP} \times F1_{IAT} \times F1_{H} \times F1_{IDP} \times F1_{EDP} \times F1_{FH} \quad (3\text{-}50)$$

เมื่อ

$kWhc$ = พลังงานไฟฟ้าปรับแก้ที่ผลิตได้ทั้งหมด (kW)

kWh = พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด (kW)

$F1_{BP}$ = ค่าแก้ความดันบรรยากาศ

$F1_{IAT}$ = ค่าแก้อุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ

$F1_{H}$ = ค่าแก้ความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ

$F1_{IDP}$ = ค่าแก้ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศ

$F1_{EDP}$ = ค่าแก้ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซ

$F1_{FH}$ = ค่าแก้ชั่วโมงการเดินเครื่อง

3.6.1 ค่าแก้ความดันบรรยากาศ

ค่าแก้ความดันบรรยากาศเป็นค่าแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สภาวะจริงไปที่สภาวะออกแบบโดยแสดงในรูปอัตราส่วนระหว่าง ความดันบรรยากาศที่สภาวะออกแบบต่อความดันบรรยากาศจากการตรวจวัดจริง สมการสำหรับคำนวณ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) คือ

$$F1_{BP} = \frac{CF1_{BPR}}{CF1_{BPM}} \quad (3\text{-}51)$$

เมื่อ

$F1_{BP}$ = ค่าแก้ความดันบรรยากาศ

$CF1_{BPR}$ = ค่าแก้ความดันบรรยากาศที่สภาวะออกแบบ

$CF1_{BPM}$ = ค่าแก้ความดันบรรยากาศที่สภาวะการตรวจวัดจริง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.6.1.1 ค่าแก้ความดันบรรยากาศที่สภาวะใดๆ

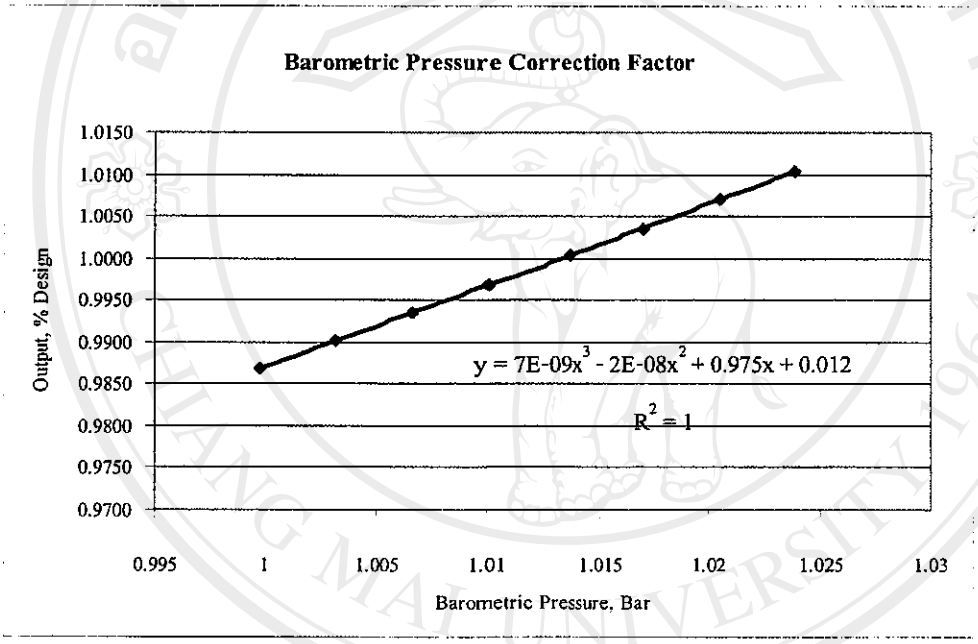
ในการคำนวณค่าแก้ความดันบรรยากาศที่สภาวะใดๆ นั้น อ้างอิงจากข้อมูลของผู้ผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) แสดงดังรูปที่ 3.22 สมการสำหรับคำนวณ คือ

$$CF1_{BP} = 7\times10^{-9}\times BP^{3} - 2\times10^{-8}\times BP^{2} + 0.975\times BP + 0.012 \quad (3\text{-}52)$$

เมื่อ

$CF1_{BP}$ = ค่าแก้ความดันบรรยากาศที่สภาวะใดๆ

BP = ความดันบรรยากาศ (Bar)



รูปที่ 3.22 แสดงกราฟค่าแก้ความดันบรรยากาศ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993)

3.6.2 ค่าแก้อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศ

ค่าแก้อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศเป็นค่าแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้ค่ากระแสไฟฟ้าจากการตรวจวัดจริงไปที่สภาวะออกแบบ สมการคำนวณค่าแก้อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศสำหรับกระแสไฟฟ้า (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) คือ

$$F1_{IAT} = \frac{CF1_{IATR}}{CF1_{IATM}} \quad (3\text{-}53)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ

Fl_{IAT} = ค่าแก้อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศ

CFl_{IATR} = ค่าแก้อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศที่สภาวะออกแบบ

CFl_{IATM} = ค่าแก้อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศที่สภาวะการตรวจวัดจริง

3.6.2.1 ค่าแก้อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศที่สภาวะใดๆ

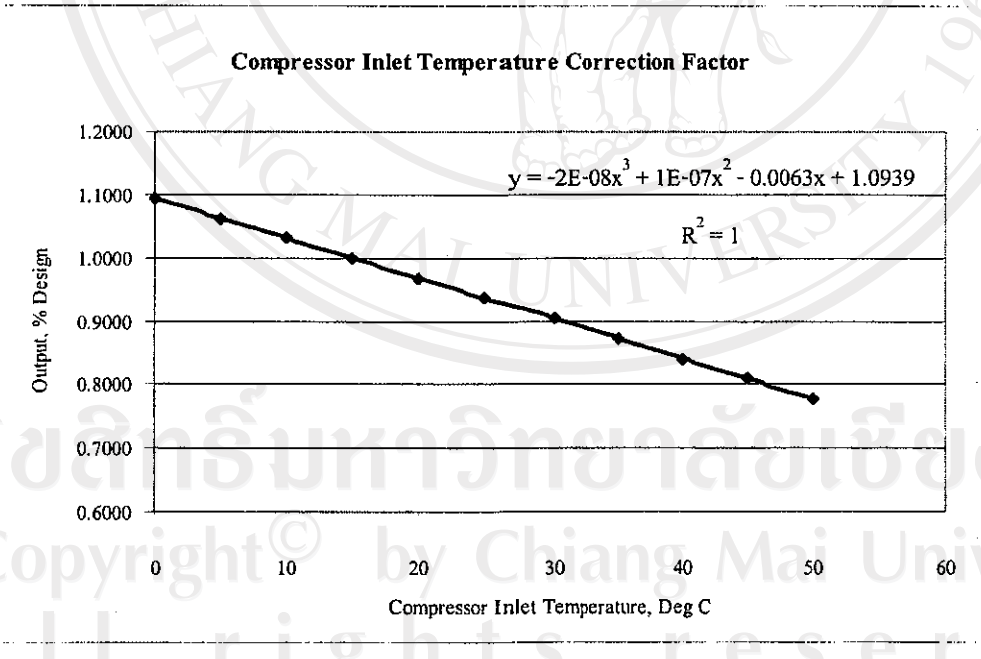
ในการคำนวณค่าแก้อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศที่สภาวะใดๆนั้น อ้างอิงจากข้อมูลของผู้ผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) แสดงดังรูปที่ 3.23 สมการสำหรับคำนวณ คือ

$$CFl_{IAT} = -2\times10^{-8}\times IAT^{3} + 1\times10^{-7}\times IAT^{2} - 0.0063\times IAT + 1.0939 \quad (3\text{-}54)$$

เมื่อ

CFl_{IAT} = ค่าแก้อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศที่สภาวะใดๆ

IAT = อุณหภูมิอากาศแห้งขาเข้าเครื่องอัดอากาศ ($^{\circ}C$)



รูปที่ 3.23 แสดงกราฟค่าแก้อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.6.3 ค่าแก้ความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ

ค่าแก้ความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ เป็นค่าแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้ค่ากระแสไฟฟ้าจากการตรวจวัดจริงไปที่สภาวะออกแบบ สมการสำหรับคำนวณ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) คือ

$$F1_H = \frac{CF1_{HR}}{CF1_{HM}} \qquad (3\text{-}55)$$

เมื่อ

$F1_H$ = ค่าแก้ความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ

$CF1_{HR}$ = ค่าแก้ความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศที่สภาวะออกแบบ

$CF1_{HM}$ = ค่าแก้ความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศที่สภาวะการตรวจวัดจริง

3.6.3.1 ค่าแก้ความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศที่สภาวะใดๆ

สมการสำหรับคำนวณค่าแก้ความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศที่สภาวะใดๆ อ้างอิงตามข้อมูลของผู้ผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) แสดงดังรูปที่ 3.24 สมการสำหรับคำนวณ คือ

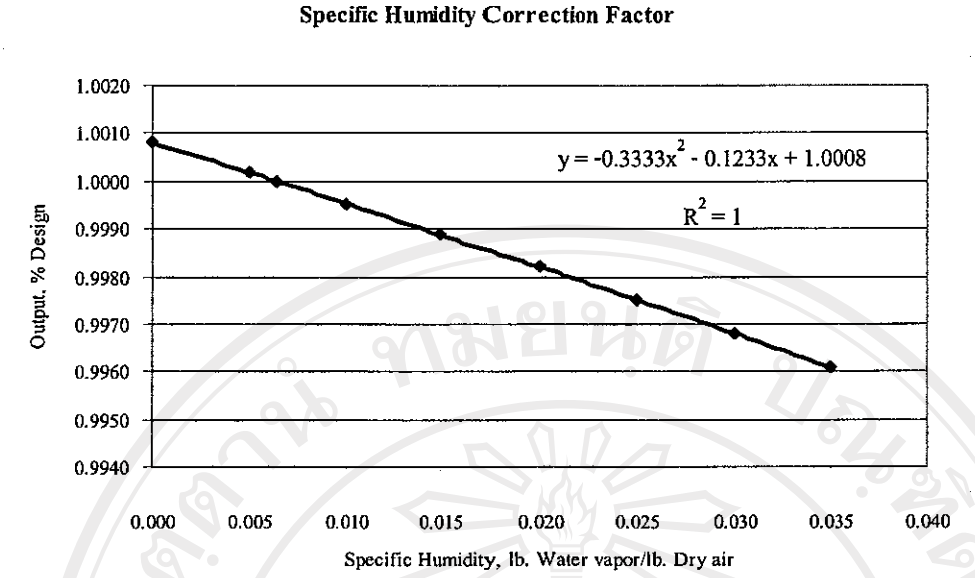
$$CF1_H = -333.33333\times10^{-3}\times SPH^2 - 0.12333333\times SPH + 1.0008 \qquad (3\text{-}56)$$

เมื่อ

$CF1_H$ = ค่าแก้ความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศที่สภาวะใดๆ

SPH = ค่าความชื้นจำเพาะ (kg water vapor/kg dry air)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.24 แสดงกราฟค่าแก้ความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องอัดอากาศ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993)

3.6.4 ค่าแก้ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศ

ค่าแก้ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศเป็นค่าแฟคเตอร์สำหรับเทียบเท่าค่ากระแสไฟฟ้าจากการตรวจวัดจริงไปที่สภาวะออกแบบ สมการสำหรับคำนวณค่าแก้ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศสำหรับกระแสไฟฟ้า (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) คือ

$$F1_{IDP} = \frac{1}{CF1_{IDPM}} \qquad (3\text{-}57)$$

เมื่อ

$F1_{IDP}$ = ค่าแก้ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศ

$CF1_{DPM}$ = ค่าแก้ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศที่สภาวะการตรวจวัดจริง

3.6.4.1 ค่าแก้ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศที่สภาวะใดๆ

สมการสำหรับคำนวณค่าแก้ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศที่สภาวะใดๆ อ้างอิงจากข้อมูลผู้ผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) แสดงดังรูปที่ 3.25 สมการสำหรับคำนวณ คือ

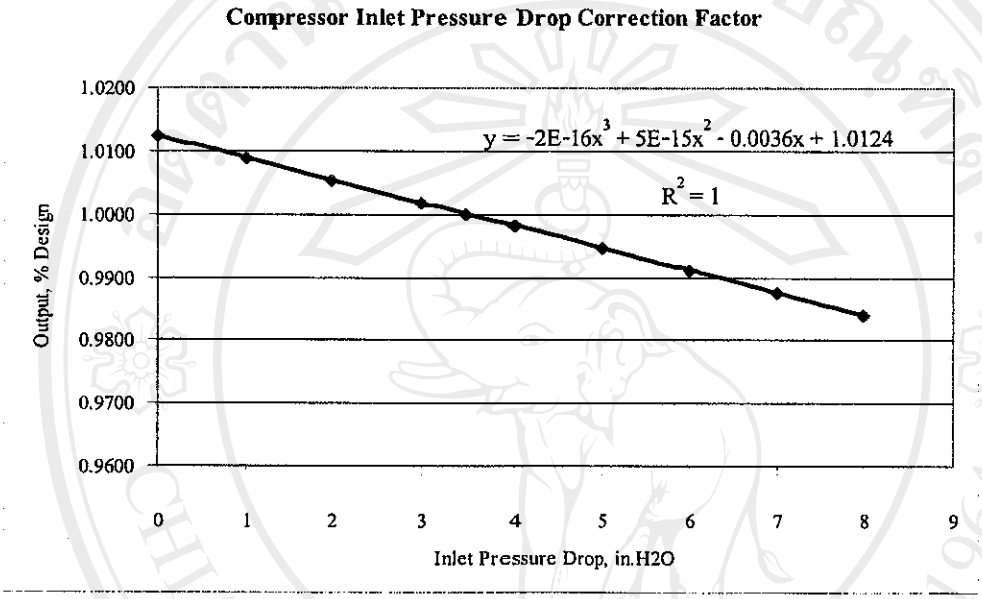
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$CF1_{IDP} = -2\times10^{-16}\times IDP^3 + 5\times10^{-15}\times IDP^2 - 0.0036\times IDP + 1.0124 \quad (3\text{-}58)$$

เมื่อ

$CF1_{IDP}$ = ค่าแก้ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศที่สภาวะใดๆ

IDP = ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศ ($in.H_2O$)



รูปที่ 3.25 แสดงกราฟค่าแก้ความดันตกคร่อมเครื่องกรองอากาศ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993)

3.6.5 ค่าแก้ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซ

ค่าแก้ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซเป็นค่าแฟคเตอร์สำหรับเทียบเท่าค่ากระแสไฟฟ้าจากการตรวจวัดจริงไปที่สภาวะออกแบบสมการคำนวณค่าแก้ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซสำหรับกระแสไฟฟ้า (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) คือ

$$F1_{EDP} = \frac{1}{CF1_{EDPM}} \quad (3\text{-}59)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ

$F1_{EDP}$ = ค่าแก้ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซ

$CF1_{EDPM}$ = ค่าแก้ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซที่สภาวะการตรวจวัดจริง

3.6.5.1 ค่าแก้ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซที่สภาวะใดๆ

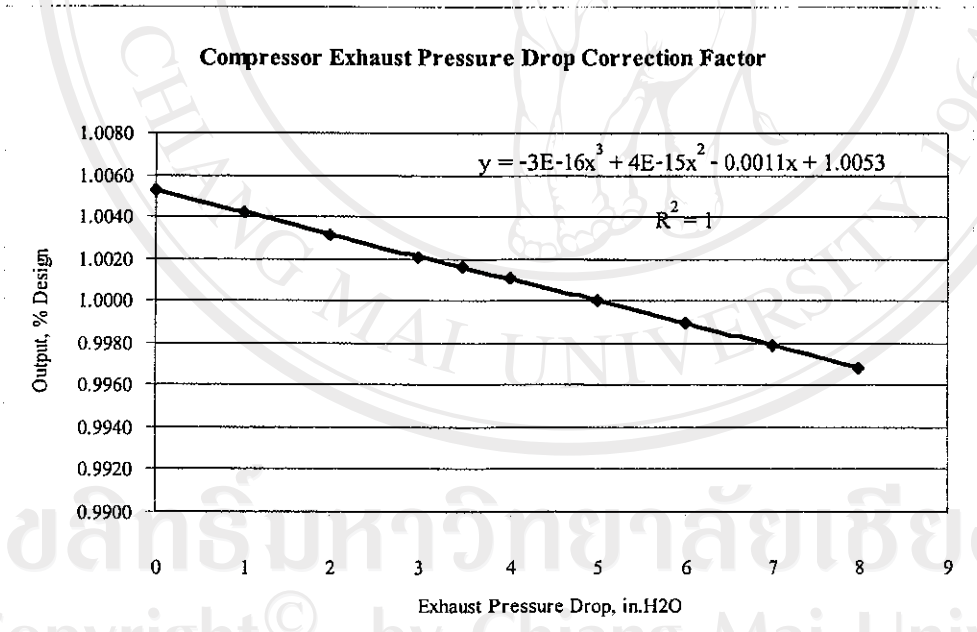
สมการสำหรับคำนวณค่าแก้ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซที่สภาวะใดๆ อ้างอิงจากข้อมูลของผู้ผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) แสดงดังรูปที่ 3.26 สมการสำหรับคำนวณ คือ

$$CF1_{EDP} = -3\times10^{-16}\times EDP^3 + 4\times10^{-15}\times EDP^2 - 0.0011\times EDP + 1.0053 \quad (3\text{-}60)$$

เมื่อ

$CF1_{EDP}$ = ค่าแก้ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซที่สภาวะใดๆ

EDP = ค่าความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซ ($in.H_2O$)



รูปที่ 3.26 แสดงกราฟค่าแก้ความดันตกคร่อมขาออกจากกังหันก๊าซ (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.6.6 ค่าแก้ชั่วโมงการใช้งานเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

สมการหาค่าแก้ชั่วโมงการใช้งานเครื่องยนต์กังหันก๊าซสำหรับกระแสไฟฟ้าเป็นค่าแก้ค่ากระแสไฟฟ้าจากการตรวจวัดจริงที่เกิดจากการเสื่อมสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซตามอายุการใช้งาน สมการคำนวณค่าแก้ชั่วโมงการเดินเครื่อง คือ

$$F1_{FH} = \frac{1}{CF1_{FHM}} \qquad (3\text{-}61)$$

เมื่อ

$F1_{FH}$ = ค่าแก้ชั่วโมงการเดินเครื่อง

$CF1_{FHM}$ = ค่าแก้ชั่วโมงการเดินเครื่องที่สภาวะการตรวจวัดจริง

3.6.6.1 ค่าแก้ชั่วโมงการใช้งานเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่สภาวะใดๆ

สมการคำนวณค่าแก้ชั่วโมงการใช้งานเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่สภาวะใดๆ อ้างอิงจากข้อมูลผู้ผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (South Bangkok Combined Cycle Plant Performance Test Report, 1997) แสดงดังรูปที่ 3.27 สมการสำหรับคำนวณ คือ

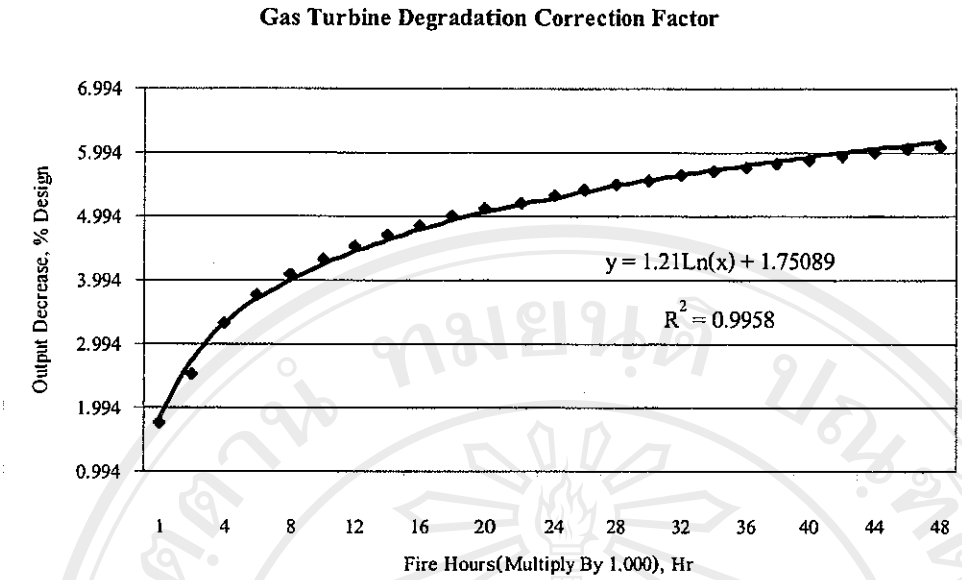
$$CF1_{FH} = 1.21LN(FH)+1.75089 \qquad (3\text{-}62)$$

เมื่อ

$CF1_{FH}$ = ค่าแก้ชั่วโมงการเดินเครื่องที่สภาวะใดๆ

FH = ชั่วโมงการเดินเครื่อง (Hr)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.27 แสดงกราฟค่าแก้ชั่วโมงการใช้งานเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (South Bangkok Combined Cycle Plant Performance Test Report, 1997)

3.7 การคำนวณหาค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่สภาวะมาตรฐาน

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ นอกจากจะวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้แล้วนั้น จะต้องพิจารณาจากอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิตด้วย ซึ่งในการที่จะทราบถึงค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิตนั้น จะต้องทราบถึงปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ณ โหลดที่ทำการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นๆ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่สภาวะมาตรฐาน (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993) อุณหภูมิอากาศ 15 °C ความดันบรรยากาศ 1.0136 Bar ความชื้นสัมพัทธ์ 60 % แสดงดังรูปที่ 3.28 คือ

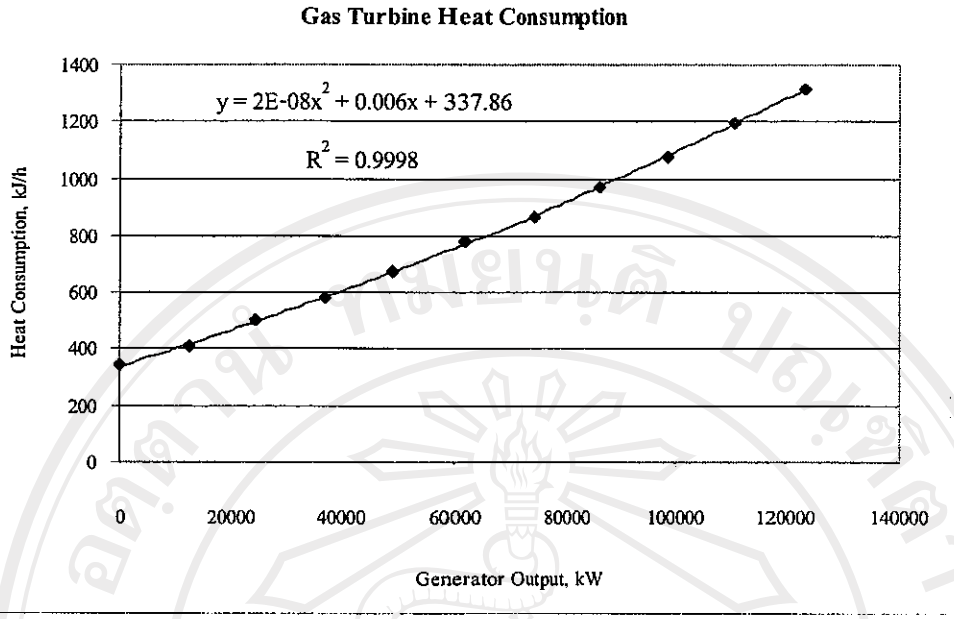
$$HC_{ISO} = 0.00000002 \times kW^2 + 0.06 \times kW + 337.86 \quad (3\text{-}63)$$

เมื่อ

HC_{ISO} = ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่สภาวะมาตรฐาน (kJ)

kW = ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิต (kW)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ความร้อนกับกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า (MS9001E Gas Turbine Operation, 1993)

3.8 พลังงานความร้อนที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

ค่าพลังงานความร้อนที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซจะคำนวณได้จากการสมดุลย์พลังงาน ซึ่งค่าแฟคเตอร์ที่นำมาสมดุลย์พลังงาน ได้แก่ ค่าพลังงานจากอากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องอัดอากาศ ค่าพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิง ค่าพลังงานจากการฉีดน้ำเข้าห้องเผาไหม้ พลังงานที่สูญเสียที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าพลังงานที่สูญเสียที่เฟืองขับ ค่าพลังงานที่สูญเสียเบ็ดเตร็ด ค่าพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสมการสำหรับคำนวณค่าความร้อนที่ปล่อยทิ้งออกจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (South Bangkok Combined Cycle Plant Performance Test Report, 1997) คือ

$$Q_{EXH} = Q_{CI} + Q_{FUEL} + Q_{CF} + Q_{WI} - Q_{GEN} - Q_{GEAR} - Q_{MISC} - Q_{KW} \quad (3\text{-}64)$$

เมื่อ

Q_{EXH} = ค่าพลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยออกจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Btu/h)

Q_{CI} = ค่าพลังงานจากอากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องอัดอากาศ (Btu/h)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Q_{FUEL} = ค่าพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิง (Btu/h)

Q_{WI} = ค่าพลังงานจากการฉีดน้ำเข้าห้องเผาไหม้ (Btu/h)

Q_{GEN} = พลังงานที่สูญเสียที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า = 6.47×10^{-6} Btu/h

Q_{GEAR} = ค่าพลังงานที่สูญเสียที่เฟืองขับ = 0 Btu/h

Q_{MISC} = ค่าพลังงานที่สูญเสียเบ็ดเตร็ด = 23.60×10^{-6} Btu/h

Q_{KW} = ค่าพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Btu/h)

3.8.1 ค่าพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิง

ค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง ที่เกิดจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (South Bangkok Combined Cycle Plant Performance Test Report, 1997) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_{FUEL} = W_{FG} \times HHV + W_{FG} \times C_{CF} \times (T_F - T_R) \quad (3\text{-}65)$$

เมื่อ

Q_{FUEL} = ค่าพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิง (Btu/h)

W_{FG} = อัตราการไหลมวลของเชื้อเพลิง (LB/h)

HHV = ค่าความร้อนรวมของเชื้อเพลิง (Btu/lb)

C_{CF} = ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง (Btu/lb °F)

T_F = อุณหภูมิเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าห้องเผาไหม้ (°F)

T_R = อุณหภูมิอากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศ

3.8.2 พลังงานจากการฉีดน้ำเข้าภายในห้องเผาไหม้

ค่าพลังงานที่เกิดจากการฉีดน้ำเข้าภายในห้องเผาไหม้ เพื่อควบคุมการเกิดมลภาวะทางอากาศ ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ (South Bangkok Combined Cycle Plant Performance Test Report, 1997) คำนวณได้จากสมการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$Q_{WI} = W_{WI} \times (h_{WI} - h_R) \quad (3\text{-}66)$$

เมื่อ

Q_{WI} = ค่าพลังงานที่เกิดจากการฉีดน้ำเข้าภายในห้องเผาไหม้

W_{WI} = อัตราการไหลมวลของน้ำที่ฉีดเข้าห้องเผาไหม้ (LB/h)

h_{WI} = ค่าเอนทาลปีของน้ำที่ฉีดเข้าห้องเผาไหม้ (Btu/lb)

h_R = ค่าเอนทาลปีของน้ำที่สภาวะอ้างอิง (Btu/lb)

เนื่องจากผลการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยออกจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ตามสมการ (3-59) แสดงค่าผลการคำนวณในหน่วยอังกฤษ สามารถแปลงให้อยู่ในหน่วย SI ได้โดยการใช้แฟคเตอร์แปลงหน่วย (South Bangkok Combined Cycle Plant Performance Test Report, 1997) สมการที่ใช้ในการแปลงหน่วย คือ

$$Q_{EXHSI} = Q_{EXH} \times 1.0543 \quad (3\text{-}67)$$

เมื่อ

Q_{EXHSI} = ค่าพลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยออกจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (kJ/h)

Q_{EXH} = ค่าพลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยออกจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Btu/h)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved