

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ในเครื่องกังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม

นาฏนิภา ชูจิตารมย์^{1,*} และ วิทยา ยงเจริญ²

¹สหสาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Email: nartnipa.c@egat.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ในเครื่องกังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม เนื่องจากประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ที่ลดลงส่วนใหญ่มาจากสิ่งสกปรกที่เกาะติดที่ใบพัดของคอมเพรสเซอร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าโดยรวมลดลง ดังนั้นการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ จะทำให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก (Isentropic Efficiency) เพิ่มกลับคืนมาได้ในระดับหนึ่ง โดยประสิทธิภาพที่เพิ่มจะขึ้นอยู่กับความถี่ในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ ได้มีการศึกษาและจัดเก็บข้อมูลจากการเดินเครื่องผลิตไฟฟ้ากังหันก๊าซจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ขนาดกำลังการผลิต 704 เมกะวัตต์ ประกอบด้วยเครื่องผลิตไฟฟ้ากังหันก๊าซจำนวน 2 เครื่อง ขนาดกำลังผลิตเครื่องละ 221 เมกะวัตต์ และเครื่องผลิตไฟฟ้ากังหันไอน้ำจำนวน 1 เครื่อง ขนาดกำลังผลิต 262 เมกะวัตต์ คอมเพรสเซอร์ในเครื่องกังหันก๊าซมีจำนวน 18 stage มีอัตราส่วนความดันเท่ากับ 16.6:1 และตัวประกอบการใช้งานของโรงไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.79 โดยมีการจัดเก็บข้อมูลในระยะเวลาอย่างน้อย 2 ปีและนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพ ตัวแปรอิสระที่ใช้ศึกษาคือ อุณหภูมิขาเข้าและออกจากคอมเพรสเซอร์ ความดันขาเข้าและออกจากคอมเพรสเซอร์ และระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด ส่วนการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ของเครื่องกังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมนั้น คิดจากราคาค่าใช้จ่ายต่ำสุดโดยค่าใช้จ่ายประกอบด้วยค่าเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นในการผลิตไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตให้คงที่ รวมกับค่าทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ของเครื่องกังหันก๊าซ และค่าเสียโอกาส ส่วนของผลประโยชน์จะคิดในส่วนของปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้คงที่ ซึ่งจะมีค่าเท่ากันในทุกๆความถี่ในการทำความสะอาด จากการวิเคราะห์ พบว่า อัตราการลดลงของประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ คือ 0.31% ต่อเดือน สำหรับคอมเพรสเซอร์ตัวที่ 1 และ 0.37% ต่อเดือน สำหรับคอมเพรสเซอร์ตัวที่ 2 และระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดแบบออฟไลน์ คือ ทุกๆระยะเวลา 6 เดือน

คำสืบค้น

การทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์, ระยะเวลาที่เหมาะสม, กังหันก๊าซ, โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม, ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก

STUDY OF THE SUITABLE CLEANING TIME INTERVAL OF COMPRESSOR IN GAS TURBINE OF COMBINED CYCLE POWER PLANT

Narnipa Chujitarom^{1,} and Witthaya Yongchareon²*

¹Energy Technology and Management Program, Chulalongkorn University

²Energy Research Institute, Chulalongkorn University

**Email: narnipa.c@egat.co.th*

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the optimal cleaning time interval of compressor in gas turbine of a combined cycle power plant. A major cause of reduced compressor efficiency is from compressor blade fouling, which results in a lower overall power plant efficiency. Compressor off-line cleaning can recover some of the lost Isentropic Efficiency. The level of efficiency depends on the cleaning time interval. The data for this study are collected from the operational data of combined cycle power plant within the past 2 years. This plant comprises with two 221 MW gas turbines and a 262 MW steam turbine and has a generating capacity of 704 MW. Gas turbine Compressor has 18 stages and 16.6:1 pressure ratio. The plant average utilization factor is 0.79%. Variables affect compressor efficiency, such as inlet & outlet compressor temperature, inlet & outlet compressor pressure and cleaning time, are used to determine the compressor efficiency. The optimal cleaning time is analyzed by using the minimum expense cost which consists of the additional fuel cost (to maintain the same plant electrical power output against degradation of plant efficiency), cleaning cost and lost opportunity cost. While the benefit is the constant electrical power output which is independent of cleaning time. From the analysis it was found that the degradation of compressor efficiency is 0.31 % per month for compressor 1 and 0.37% per month for compressor 2 and the optimal cleaning time is every 6 months.

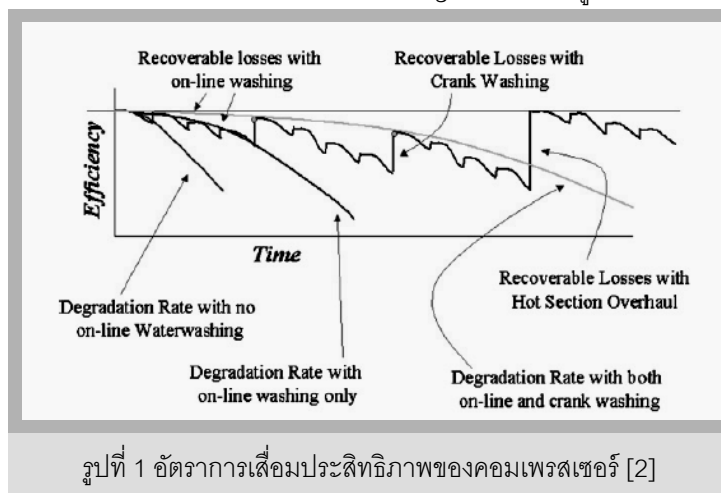
KEYWORDS

Compressor Cleaning, Suitable Cleaning Time, Gas Turbine, Combined Cycle Power Plant, Isentropic Efficiency

1. บทนำ

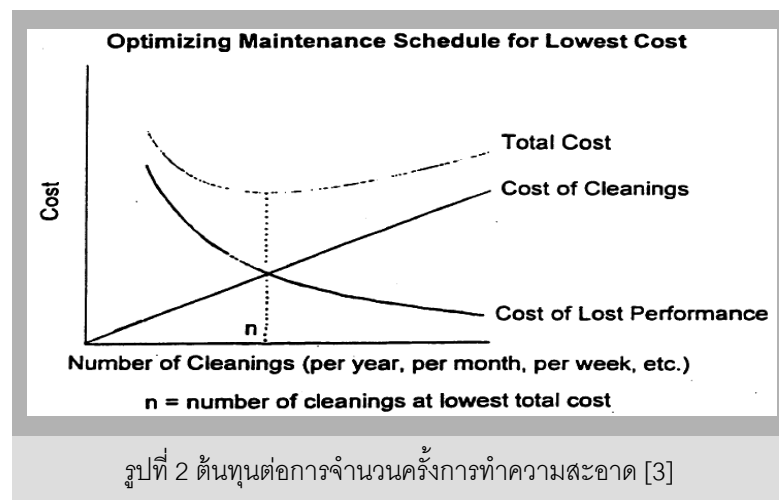
ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการในการใช้ไฟฟ้าในปริมาณที่สูงมากขึ้นทุกปี ซึ่งไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการพัฒนาเศรษฐกิจและการเติบโตของประเทศ การทำให้โรงไฟฟ้าสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างเต็มประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ช่วยในการชะลอการสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ในปัจจุบันนั้นค่อนข้างเป็นไปได้ยาก เนื่องจากต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อประชาชนและสิ่งแวดล้อมเป็นหลัก โรงไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยและมีการผลิตไฟฟ้าโดยส่วนมากในประเทศไทยมาจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plant) โดยกังหันก๊าซ (Gas Turbine) เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ส่งผลต่อกำลังการผลิตไฟฟ้า ซึ่งการทำให้กังหันก๊าซมีกำลังการผลิตอยู่ในเกณฑ์ปกติ จะทำให้โรงไฟฟ้ามีส่วนการใช้พลังงานสำหรับการผลิตไฟฟ้าเป็นปกติได้

กังหันก๊าซมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ 1. คอมเพรสเซอร์หรือเครื่องอัดอากาศ (Compressor) 2. ห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) 3. กังหัน (Turbine) โดยคอมเพรสเซอร์ใช้เพลาชุดเดียวกันกับกังหันและใช้พลังงานที่ได้จากกังหัน ดังนั้นหากประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ลดลง จะทำให้งานที่นำไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ของกังหันก๊าซลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าโดยรวมลดลงด้วย จรัส พิสัยพันธ์ [1] พบว่าประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ในเครื่องกังหันก๊าซมีผลต่อประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โดยอธิบายได้ด้วยประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของคอมเพรสเซอร์ (Isentropic Efficiency) ความสกปรกที่เกิดขึ้นบนใบพัดจะส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อชั่วโมงการเดินเครื่องมากขึ้น ประสิทธิภาพสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยขึ้นอยู่กับระยะเวลาความถี่ในการทำทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ Aretakis et al. [2] ปัญหาหลักของการเสื่อมสมรรถนะของคอมเพรสเซอร์และกังหันก๊าซมาจากการปนเปื้อนในอากาศและสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดคราบสกปรกที่ตัวใบพัดของคอมเพรสเซอร์ จนทำให้ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ลดลง โดยคราบสกปรกที่ติดอยู่สามารถกำจัดไปได้โดยการล้างทั้งแบบการทำความสะอาดแบบออฟไลน์ (Off-line cleaning) ซึ่งจะต้องทำขณะที่หยุดเดินเครื่องกังหันก๊าซและวิธีการทำความสะอาดแบบออนไลน์ (On-line cleaning) ต้องทำขณะเดินเครื่อง โดยประสิทธิภาพของกังหันก๊าซมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะการทำความสะอาดกับประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกราฟรูปที่ 1 เส้นโค้งที่มีความชันสูงสุดเป็นประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์ที่ไม่มีการทำความสะอาด เส้นโค้งตรงกลางมีการทำความสะอาดแบบ on-line cleaning เพียงอย่างเดียว ส่วนเส้นโค้งที่มีความชันน้อยที่สุดมีการทำความสะอาดทั้งแบบ on-line cleaning และแบบ off-line cleaning จะเห็นได้ว่าการทำความสะอาดแบบ off-line cleaning สามารถฟื้นฟูประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์ได้ดีที่สุด



การทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ off-line cleaning จำเป็นจะต้องทำการหยุดเดินเครื่องกังหันก๊าซก่อนการทำความสะอาด ทำให้ต้องหยุดผลิตกระแสไฟฟ้าของเครื่องกังหันก๊าซด้วย ซึ่งทำให้เสียโอกาสในการขายกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า นอกจากนี้การทำความสะอาดใบพัดของคอมเพรสเซอร์ ยังมีค่าใช้จ่ายอื่น ๆ อีก เช่น ค่าน้ำยาทำความสะอาด ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินเครื่องระหว่างการทำความสะอาด และค่าแรง เป็นต้น ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ในเครื่องกังหันก๊าซ

Koch et al. [3] ได้ศึกษาสมการในการคำนวณระยะเวลาความถี่ที่เหมาะสมในการทำความสะอาด คอนเดนเซอร์ (Condenser), คอมเพรสเซอร์ (Compressor) และ เฮทอาร์เอสจี (HRSG) ในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม จากกราฟในรูปที่ 2 เป็นแนวทางในการหาความถี่ (n) ที่เหมาะสมในการทำความสะอาด โดยคิดจากการรวมกันของค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด (ยิ่งทำความสะอาดบ่อยครั้งต้นทุนยิ่งสูงขึ้น) กับการสูญเสียรายได้เนื่องจากการเสื่อมประสิทธิภาพ (จะลดลงเมื่อมีการทำความสะอาดบ่อยครั้ง)



สมการที่ใช้คิดราคาการทำความสะอาดรวมกับราคาจากการสูญเสียของประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์ของกังหันก๊าซ คือ

$$nC + nV \int_0^{P/n} f(t) dt \quad (1)$$

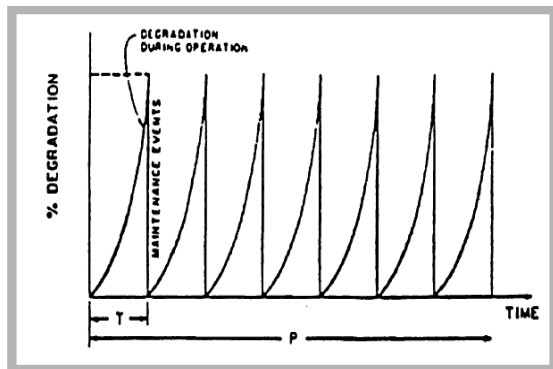
โดยที่ n = จำนวนครั้งในการทำ off-line cleaning (การทำความสะอาดต่อปี, ต่อเดือน)

V = ค่าของสมรรถนะคอมเพรสเซอร์ในเครื่องกังหันก๊าซ (บาทต่อ% ต่อปี, ต่อเดือน)

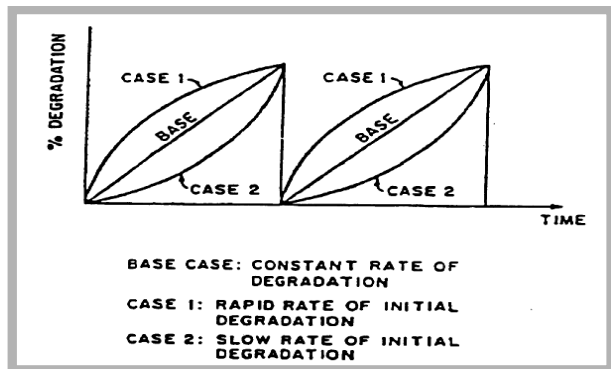
C = ต้นทุนในการทำความสะอาด (บาท)

P = ช่วงระยะเวลา (ปี, เดือน)

และ $f(t)$ เป็นกราฟการเสื่อมประสิทธิภาพ (Degradation Curve) ของคอมเพรสเซอร์ในเครื่องกังหันก๊าซ



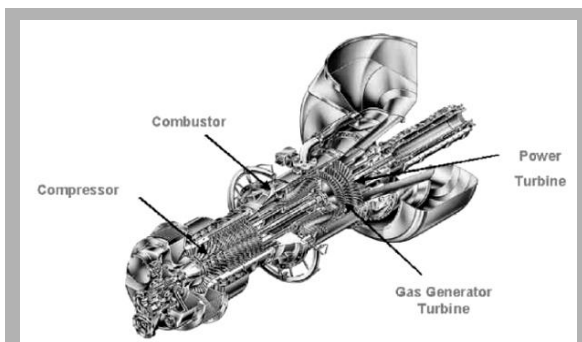
รูปที่ 3 %degradation ต่อช่วงเวลา [3]



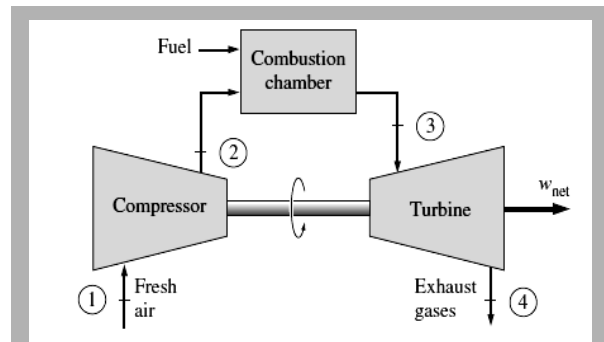
รูปที่ 4 %degradation รูปแบบต่างๆต่อเวลา [3]

2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กังหันก๊าซ (Gas turbine)



รูปที่ 5 กังหันก๊าซ [4]

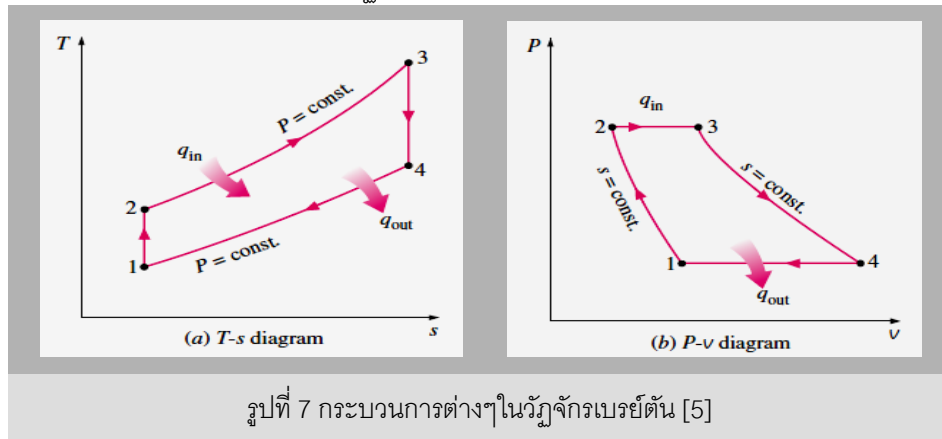


รูปที่ 6 กังหันก๊าซแบบวัฏจักรเปิด [5]

กังหันก๊าซ (Gas turbine) เป็นเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะขยายตัวขับเคลื่อนพัดของกังหันก๊าซ เป็นการแปลงผันพลังงานความร้อนจำนวนหนึ่งของก๊าซไปเป็นพลังงานกลโดยการหมุนเพลามีส่วนประกอบหลัก ๆ คือ

- คอมเพรสเซอร์ ทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายนอกที่สภาวะ 1 และอัดอากาศที่ไหลเข้ามาด้วยใบพัด (Compressor blades) ทำให้อากาศมีความดันและอุณหภูมิสูงที่สภาวะ 2 จากนั้นอากาศอัดจะถูกส่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้
- ห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) ทำหน้าที่เผาไหม้อากาศอัดความดันสูงที่ผสมกับเชื้อเพลิงภายใต้ความดันคงที่ จะได้ก๊าซร้อนที่มีอุณหภูมิและความดันสูงที่สภาวะ 3 ส่งไปยังส่วนของกังหันต่อไป
- กังหัน (Turbine) ทำหน้าที่แปลงผันพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งจากก๊าซร้อนที่ขยายตัวซึ่งได้จากห้องเผาไหม้ไปเป็นพลังงานกลโดยการหมุนผ่านชุดใบพัด (Turbine blades) ส่วนไอเสียที่ออกจากกังหันที่สภาวะ 4 จะนำทิ้งออกสู่บรรยากาศถ้าไม่นำมาใช้ประโยชน์อีกต่อไป

การทำงานของกังหันก๊าซสามารถอธิบายจากวัฏจักรเบรย์ตัน (Brayton cycle: Ideal cycle for Gas turbine engine)



ในวัฏจักรเบรย์ตันมีมาตรฐานอากาศประกอบด้วยกระบวนการย้อนกลับดังนี้

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการอัดตัวแบบไอเซนโทรปิก (คอมเพรสเซอร์)

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการรับความร้อนภายใต้ความดันคงที่ (ห้องเผาไหม้)

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก (กังหันก๊าซ)

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการถ่ายความร้อนทิ้งภายใต้ความดันคงที่ (การขับไล่ไอเสีย)

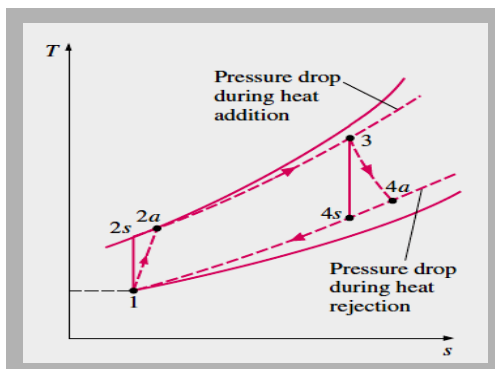
จาก กระบวนการ 1-2 และกระบวนการ 3-4 เป็นประสิทธิภาพทางไอเซนโทรปิก (Isentropic efficiency) ซึ่งเป็นสมรรถนะของอุปกรณ์ภายใต้กระบวนการในอุดมคติที่มีของไหลคงตัว โดยมีอัตราความดัน (pressure ratio) เท่ากัน ดังนั้น

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4} \quad (2)$$

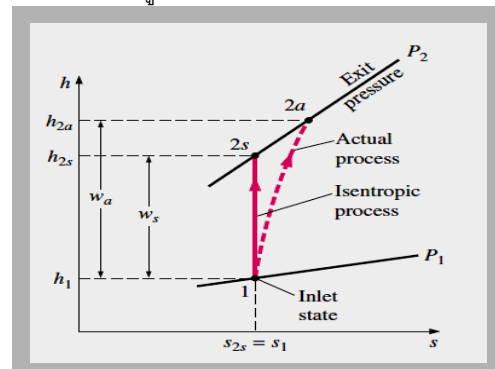
จะได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักร เท่ากับ

$$\eta = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}} \quad (3)$$

แต่ในกระบวนการของวัฏจักรกังหันจริงแตกต่างจากในวัฏจักรในอุดมคติของเบรย์ตัน เนื่องจากผลของความเสียดทานและการทำงานภายใต้กระบวนการไม่สมดุลการอัดอากาศ และความดันลดในกระบวนการรับความร้อนและกระบวนการถ่ายความร้อนทิ้ง ทำให้เกิดสภาพย้อนกลับไม่ได้ในคอมเพรสเซอร์และกังหันก๊าซ ดังรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 8 วัฏจักรกังหันจริง [5]



รูปที่ 9 h-s diagram ของกระบวนการไอเซนโทรปิกและกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงในคอมเพรสเซอร์ [5]

จะได้ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์เท่ากับ

$$\eta_c = \frac{w_s (\text{Isentropic_work})}{w_a (\text{Actual_work})} \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (4)$$

ดังนั้น

$$\eta_c = \frac{100 \times T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

โดยที่

T_1 (Compressor Inlet Temperature) = อุณหภูมิขาเข้าคอมเพรสเซอร์

T_2 (Compressor Outlet Temperature) = อุณหภูมิขาออกคอมเพรสเซอร์

P_1 (Compressor Inlet Pressure) = ความดันขาเข้าคอมเพรสเซอร์

P_2 (Compressor Inlet Pressure) = ความดันขาออกคอมเพรสเซอร์

k (specific heat) = ค่าความร้อนจำเพาะ (อากาศ = 1.4)

h (enthalpy) = เอนทัลปีที่เข้าหรือออกจากระบบ

ความสกปรกที่คอมเพรสเซอร์ (Compressor Fouling)

ความสกปรกที่เกิดขึ้นในคอมเพรสเซอร์ โดยมีคราบหรือสิ่งสกปรกต่างๆเกาะติดอยู่ที่ใบพัดคอมเพรสเซอร์ (Deposits, Fouling of Compressor Blade) อันเนื่องมาจากอากาศที่ดูดเข้ามามีทั้งฝุ่น ละออง เขม่าควัน การปนเปื้อนต่าง ๆ ที่หลุดผ่านระบบการกรอง หรือน้ำมันหล่อลื่น และขี้เถ้าภายในระบบเอง ส่งผลให้ค่าแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการไหลลดลง ส่งผลโดยตรงทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศลดลง เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศจึงมีการทำความสะอาดเครื่องอัดอากาศขึ้น โดยมี 2 รูปแบบ คือ การทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออนไลน์ (On-line cleaning) และการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ (Off-line cleaning) ทั้งสองรูปแบบใช้การฉีดน้ำผสมสารเคมีในการทำความสะอาดลงไปบนใบพัด แต่แตกต่างกัน โดย On-line cleaning สามารถทำความสะอาดได้ในขณะที่กำลังเดินเครื่อง ขณะที่ Off-line cleaning ต้องหยุดการเดินเครื่อง เพื่อลดอุณหภูมิภายในเครื่องอัดอากาศทำให้การทำความสะอาดได้ดีกว่าแบบ On-line cleaning ที่มีการเดินเครื่องในขณะที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดระเหยไปได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตาม แบบ Off-line cleaning มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า ทั้งค่าแรงงาน ค่าสารเคมี และค่าการเสียโอกาสเนื่องจากการหยุดเดินเครื่อง โดยคิดค่าใช้จ่ายในการทำ Off-line cleaning จาก

$$CO = C1+C2+C3+C4+C5 \quad (6)$$

โดยที่

CO = ค่าใช้จ่ายในการทำ off-line cleaning ต่อครั้ง, บาท

C1 = ค่าการเสียโอกาสในการสูญเสียกำไรอันเนื่องมาจากการหยุดการผลิตไฟฟ้า ต่อวัน, บาท

C2 = ค่าสารเคมีที่ใช้ในการทำทำความสะอาด ต่อครั้ง, บาท

C3 = ค่าแรงในการทำ off-line cleaning ต่อครั้ง, บาท

C4 = ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินอุปกรณ์ระหว่างการทำ off-line cleaning ต่อครั้ง, บาท

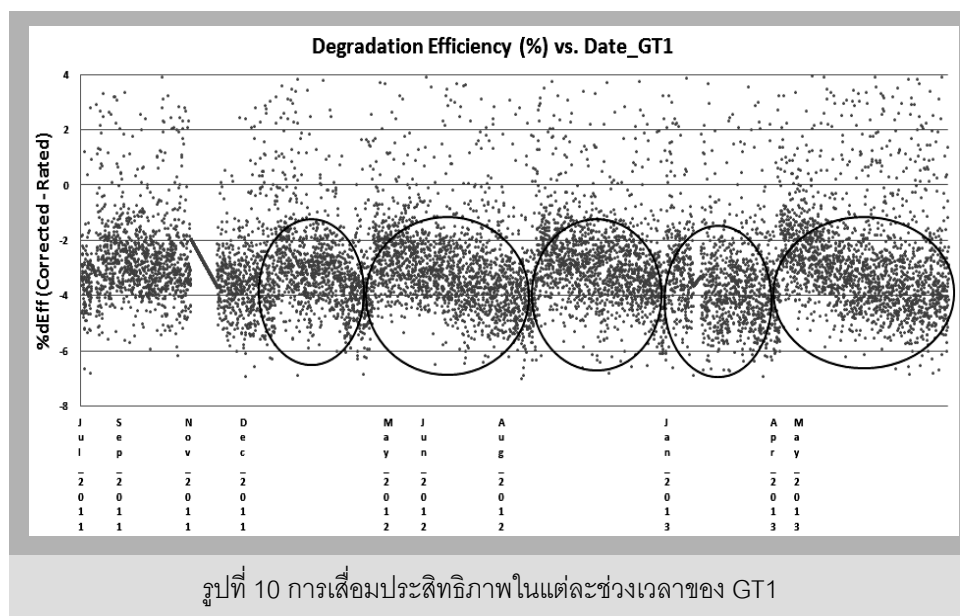
C5 = ต้นทุนการ start-up โรงไฟฟ้า ต่อครั้ง, บาท

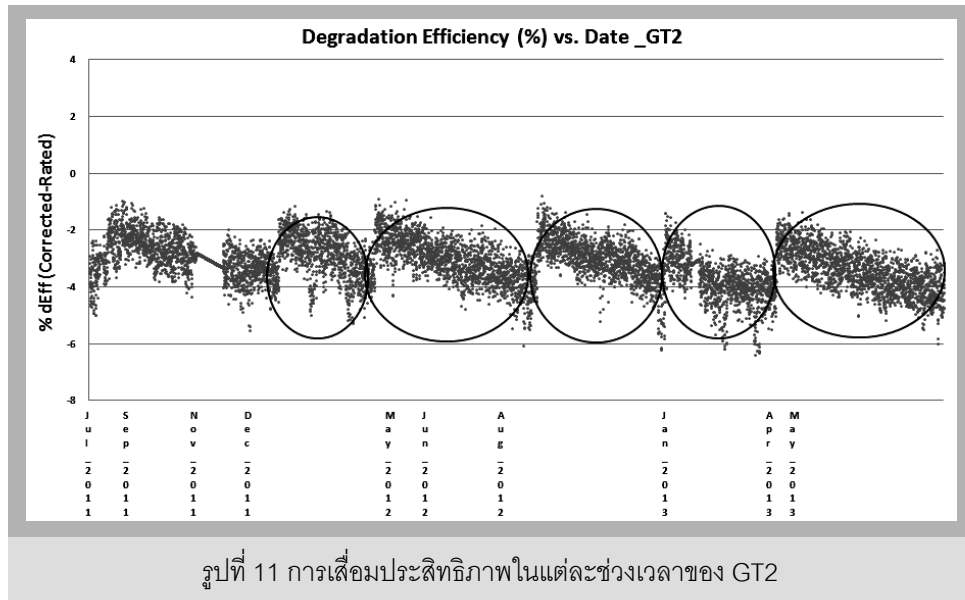
3. วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิเคราะห์ข้อมูล

รวบรวมข้อมูลก่อนและหลังการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ของเครื่องกังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม A ระยะเวลาย้อนหลัง 2 ปี โดยจัดเก็บข้อมูลจากการเดินเครื่องผลิตไฟฟ้ากังหันก๊าซจำนวน 2 เครื่อง ขนาดกำลังผลิตเครื่องละ 221 เมกะวัตต์ คอมเพรสเซอร์ในเครื่องกังหันก๊าซมีจำนวน 18 stage มีอัตราส่วนความดันเท่ากับ 16.6:1 มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพโดยมีตัวแปรอิสระที่จะใช้ศึกษาคือ อุณหภูมิขาเข้าและออกจากคอมเพรสเซอร์ ความดันขาเข้าและออกจากคอมเพรสเซอร์ และระยะเวลา

3.1 หา Degradation Curve ของ Gas Turbine Compressor Efficiency

- คำนวณ Gas Turbine Compressor Efficiency (Isentropic Efficiency) จากข้อมูลการเดินเครื่องในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม A จากสมการที่ (5) โดยมีค่าประสิทธิภาพในสภาวะอ้างอิง (Rated) ของคอมเพรสเซอร์ของเครื่องกังหันก๊าซตัวที่ 1 (GT1) และ เครื่องกังหันก๊าซตัวที่ 2 (GT2) เป็น 93.41% จะได้ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเสื่อมประสิทธิภาพ (Degradation Efficiency) หลังการทำความสะอาดแบบออฟไลน์แต่ละช่วงเวลาดังรูปที่ 10 และ 11





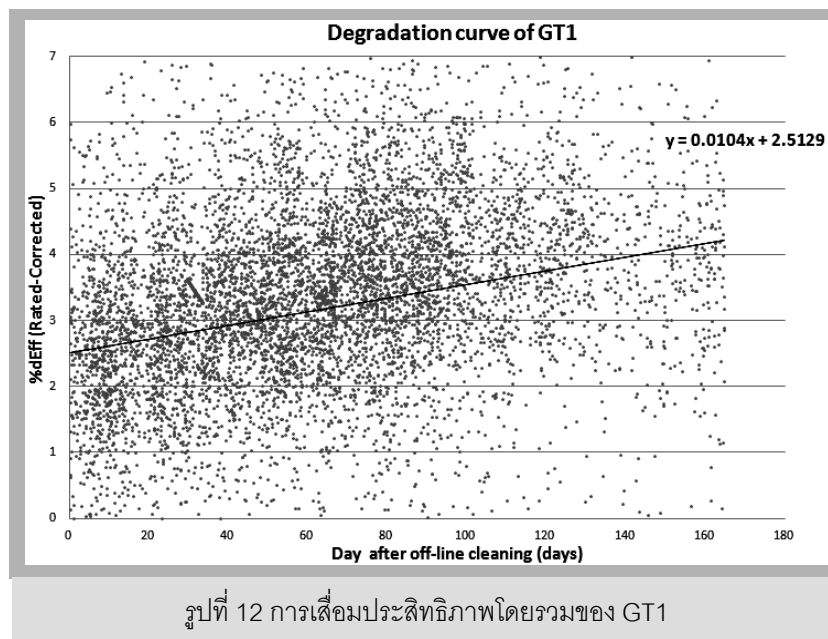
รูปที่ 11 การเสื่อมประสิทธิภาพในแต่ละช่วงเวลาของ GT2

- หากกราฟการเสื่อมประสิทธิภาพ (Degradation curve) ของ Gas turbine compressor efficiency ทั้ง 2 เครื่องได้เป็นสมการเส้นตรง y แทน % การเสื่อมประสิทธิภาพ กับ x แทนระยะเวลา (วัน) หลัง off-line cleaning

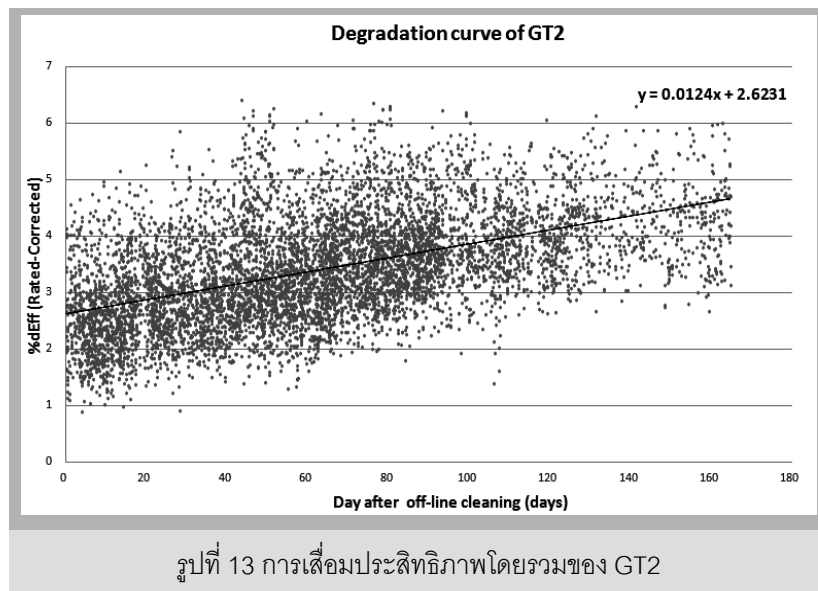
$$\text{โดย } y = 0.0104x + 2.5129 \dots \text{สำหรับกังหันก๊าซตัวที่ 1} \quad (7)$$

$$\text{และ } y = 0.0124x + 2.6231 \dots \text{สำหรับกังหันก๊าซตัวที่ 2} \quad (8)$$

แสดงดังรูปที่ 12 และ รูปที่ 13 ตามลำดับ ซึ่งเป็นกราฟการเสื่อมประสิทธิภาพโดยรวมทุกช่วงเวลาหลังวันที่มีการทำ off-line cleaning (ปรับกราฟเป็นบวกเพื่อให้ง่ายแก่การดูกราฟ แต่ยังไม่บอกถึงค่าการเสื่อมประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์เช่นเดิม)



รูปที่ 12 การเสื่อมประสิทธิภาพโดยรวมของ GT1



3.2 หาค่าต้นทุนของเชื้อเพลิงที่สูญเสียจากการเสื่อมประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ของเครื่องกังหันก๊าซ (Compressor Efficiency Loss Cost)

- จากข้อ 3.1 degradation curve มีการกระจายตัวของข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเสื่อมประสิทธิภาพ (degradation efficiency : %dEff) อยู่ในช่วง 2% ถึง 4% หรืออัตราการลดลงของประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ คือ 0.31% ต่อเดือน สำหรับคอมเพรสเซอร์ตัวที่ 1 และ 0.37% ต่อเดือน สำหรับคอมเพรสเซอร์ตัวที่ 2 เนื่องจากคอมเพรสเซอร์ทั้งสองตัวมีการกระจายตัวของข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเสื่อมประสิทธิภาพในช่วง 2% ถึง 4% และมีการสูญเสียเชื้อเพลิงเฉลี่ย -3%dEff เท่ากับ 1.005272 (interpolate จากตารางที่ 1 ที่ได้รับมาจากโรงไฟฟ้า A) หรือมีการสูญเสียเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.5272% ที่ 100%load GT ดังนั้น จะได้ว่ามีการสูญเสียเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.1757% ต่อหนึ่งเปอร์เซ็นต์การเสื่อมประสิทธิภาพ

- โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม A มีค่าเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติเท่ากับ 393 ล้านบาทต่อเดือน ที่ราคาเฉลี่ย 310 บาทต่อล้านบีทียู (ปี 2556) ดังนั้น จะสามารถหาค่าต้นทุนการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเนื่องจากการเสื่อมประสิทธิภาพได้เป็นเงิน เท่ากับ 691,353 บาท ต่อหนึ่งเปอร์เซ็นต์การเสื่อมประสิทธิภาพ ต่อเดือน ต่อเครื่องกังหันก๊าซหนึ่งตัว

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของกังหันก๊าซต่อเปอร์เซ็นต์การเสื่อมประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า A

dEff /GT load	การสูญเสียเชื้อเพลิงในแต่ละ %GT load		
%dEff	100	77.21	55.01
4	0.99425	0.99591	0.99540
2	0.99704	0.99793	0.99753
0	1.00000	1.00000	1.00000
-2	1.00320	1.00236	1.00235
-4	1.00663	1.00482	1.00489
-6	1.01023	1.00820	1.00741
-8	1.01402	1.01024	1.01048

- หาค่าสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเนื่องจากการเสื่อมประสิทธิภาพในแต่ละช่วงเวลา (Interval) โดยจะหาเปอร์เซ็นต์การเสื่อมประสิทธิภาพสะสมได้จาก การอินทิเกรตพื้นที่ใต้ degradation curve ในสมการที่ (7) และ (8) ในกรณีระยะเวลา 88 วันก่อนการทำ off-line cleaning หรือ 3 เดือนทำ off-line cleaning หนึ่งครั้ง (ใช้เวลาในการทำ off-line cleaning 2 วัน)

จะได้เปอร์เซ็นต์สะสมของการเสื่อมประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซตัวที่ 1 เท่ากับ 261.40% ต่อ 3 เดือน คิดเป็นเงินค่าเชื้อเพลิงเท่ากับ 691,353 บาทต่อเปอร์เซ็นต์ ต่อเดือน $\times$ 261.40% ต่อ 3 เดือน (ได้จากการอินทิเกรตพื้นที่ใต้ degradation curve 88 วัน) / 30 วัน = 6,023,989 บาท ต่อ 3 เดือน

ตารางที่ 2 เปอร์เซ็นสะสมจากการอินทิเกรต Degradation curve

ล้างทำความสะอาดทุก (เดือน/ครั้ง)	จำนวนวันเดินเครื่องก่อนการล้างหนึ่งครั้ง	%การเสื่อมประสิทธิภาพสะสมที่ได้จากอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟ	
		GT1	GT2
3	88	261.40	278.85
4	118	368.93	395.85
6	178	612.05	663.35
9	268	1,046.94	1,148.30
12	363	1,597.38	1,769.15
18	543	2,897.72	3,252.41

3.3 หาค่าใช้จ่ายระหว่างการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์

(Compressor Off-line Cleaning)

- หาค่าใช้จ่ายการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์จากสมการที่ (6)

โดยที่ C1 = ค่าการเสียโอกาสในการสูญเสียกำไรอันเนื่องมาจากการหยุดการผลิตไฟฟ้า

เป็นเงิน 2,818,356 บาท ต่อวัน (กำลังการผลิตไฟฟ้าต่อวัน เฉลี่ยวันละ 12,526,027.4 kWh และ สมมติฐานในการคิดกำไรต่อหน่วยเท่ากับ 0.225 บาทต่อหน่วย)

C2 = ค่าสารเคมีและน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาด เป็นเงิน 60,000 บาท ต่อครั้ง

C3 = ค่าแรงในการทำ off-line cleaning เป็นเงิน 2,000 บาท ต่อครั้ง

C4 = ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินอุปกรณ์ระหว่างการทำ off-line cleaning

เป็นเงิน 12,000 บาท ต่อครั้ง

C5 = ต้นทุนการ start-up โรงไฟฟ้า เป็นเงิน 1,100,000 บาท ต่อครั้ง

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายในการทำ off-line cleaning(CO) เป็นเงินประมาณ 4 ล้านบาท ต่อครั้งต่อวัน ต่อเครื่องกังหัน ก๊าซทั้ง 2 เครื่อง

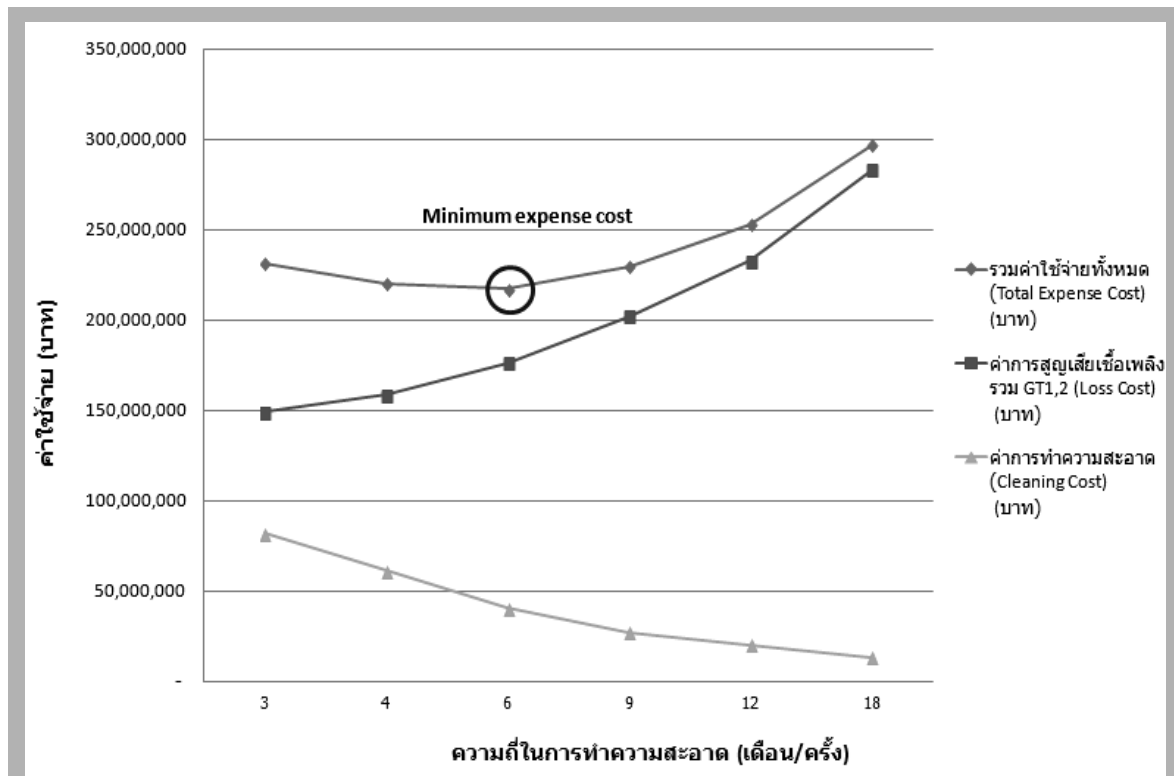
3.4 หาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ของเครื่องกังหัน

- กำหนดให้มีการทำ off-line cleaning ทุกๆ 3, 6, 9, 12 และ 18 เดือน ในระยะเวลา 3 ปี และใช้เวลาในการทำ off-line cleaning เป็นเวลา 2 วัน หาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ของเครื่องกังหัน โดย พิจารณาจากค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุด จากสมการที่ (1) ได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าใช้จ่ายในแต่ละความถี่ของการทำ off-line cleaning ของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมทั่วไป

ทำความสะอาด (เดือน/ครั้ง)	จำนวนครั้ง การทำความสะอาด ต่อ 36 เดือน	ค่าการสูญเสีย เชื้อเพลิงของ GT1 (loss cost)	ค่าการสูญเสีย เชื้อเพลิงของ GT2 (loss cost)	ค่าการสูญเสีย เชื้อเพลิงรวม GT1,2 (Loss Cost) (บาท)	ค่าการทำความสะอาด (Cleaning Cost) (บาท)	รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด (Total Expense Cost) (บาท)
3	12	72,288,975.84	77,112,296.84	149,401,272.68	82,040,547.95	231,441,820.63
4	9	76,517,636.47	82,102,579.58	158,620,216.05	61,530,410.96	220,150,627.01
6	6	84,628,935.54	91,722,162.01	176,351,097.56	41,020,273.97	217,371,371.53
9	4	96,507,532.34	105,850,716.45	202,358,248.78	27,346,849.32	229,705,098.10
12	3	110,435,449.22	122,310,930.31	232,746,379.53	20,510,136.99	253,256,516.52
18	2	133,556,471.30	149,904,093.72	283,460,565.02	13,673,424.66	297,133,989.68

- โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมทั่วไปที่ไม่มีข้อจำกัดในตารางการซ่อมบำรุงและคิดค่าใช้จ่ายการทำความสะอาดตามข้อ 3.3 ทั้งหมด จะเห็นได้ว่าการทำ off-line cleaning ทุกๆ 6 เดือน จะมีค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดเป็นเงิน 217,371,371 บาท และเมื่อคิดแยกแต่ละเครื่องกังหันก๊าซ พบว่า จะมีค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดเมื่อทำความสะอาดในสัปดาห์ที่ 6 เช่นเดียวกัน ดังตารางที่ 3 และกราฟรูปที่ 14



รูปที่ 14 ความถี่ในการทำ off-line cleaning เทียบกับค่าใช้จ่าย กรณีโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมทั่วไป

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ในเครื่องกังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม จากการรวบรวมข้อมูลการเดินเครื่องนำมาวิเคราะห์การเสื่อมประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ได้ กราฟการเสื่อมประสิทธิภาพ (degradation curve) เป็นสมการเส้นตรง โดยมีการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากการทำความสะอาดแบบออฟไลน์กระจายตัวเฉลี่ยที่ 2%-4% ในระยะเวลา 4 เดือน หรือมีอัตราการลดลงของประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ คือ 0.31% ต่อเดือน สำหรับคอมเพรสเซอร์ตัวที่ 1 และ 0.37% ต่อเดือน สำหรับคอมเพรสเซอร์ตัวที่ 2 และเมื่อคำนวณหาต้นทุนของเชื้อเพลิงที่สูญเสียจากการเสื่อมประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ รวมกับค่าใช้จ่ายระหว่างการทำทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ พบว่า การทำ off-line cleaning ทุกๆ 6 เดือน จะให้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมที่ไม่มีข้อจำกัดในส่วนของการซ่อมบำรุง โดยนำงานวิจัยนี้ไปพิจารณาใช้แนวทางการวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันได้ ทั้งนี้การเสื่อมประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ของ

เครื่องกังหันก๊าซนั้นจะมีมากหรือน้อย ขึ้นกับสภาพแวดล้อมของแต่ละที่ตั้งโรงไฟฟ้า ทั้ง ฝุ่นละออง หรือเขม่าควัน ที่ติดมากับอากาศเข้ามาเกาะที่คอมเพรสเซอร์ ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับแต่ละโรงไฟฟ้า

ในกรณีของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม A นั้นหยุดเดินเครื่องทุก 4 เดือน หรือ 3 ครั้งต่อปี ในเดือนเมษายน สิงหาคมและธันวาคม ซึ่งในการหยุดเดินเครื่องทุกครั้ง จะทำ off-line cleaning ในเดือนสิงหาคมหยุดทำการบำรุงรักษาประจำปี (Plan outage) ส่วนในเดือนเมษายนและธันวาคม ต้องหยุดเดินเครื่องเนื่องจากปัญหาหมอกควันส่งก๊าซธรรมชาติ (Gas shortage) เพื่อซ่อมบำรุงแหล่งก๊าซธรรมชาติยาดานาและเยตากุน ดังนั้นหากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม A หยุดเดินเครื่องเหลือเพียง 2 ครั้งต่อปีในกรณี gas shortage จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนการทำ off-line cleaning รวมทั้งค่าเสียโอกาสได้เป็นเงิน ประมาณ 7 ล้านบาท (คิดจากค่าเสียโอกาสในการสูญเสียกำไร (C1) เป็นเวลา 2 วัน เป็นเงินประมาณ 6 ล้านบาท และค่าใช้จ่ายในส่วนการทำ off-line cleaning อื่นๆ (C2-C5) เป็นเงินประมาณ 1 ล้านบาท)

4.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากทุกครั้งที่มีการหยุดเดินเครื่องจะมีการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ ควบคู่กับการเปลี่ยน Air inlet filter ด้วย ดังนั้นจะเป็นการดีถ้ามีการศึกษาประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์โดยศึกษาการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ร่วมกับการเลือกใช้ Air inlet filter เพราะเมื่อมีการทำความสะอาดแบบออฟไลน์น้อยครั้งลง Air inlet filter จะต้องมีอายุการใช้งานที่มากขึ้นโดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนใหม่หรือมีการทำความสะอาด Air inlet filter ก่อนการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ครั้งต่อไป

ควรมีการเปรียบเทียบข้อมูลกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมอื่นๆ ที่มีลักษณะ เงื่อนไขการเดินเครื่อง สภาพแวดล้อมต่างๆ ที่คล้ายคลึงกัน โดยมีการเก็บข้อมูลทำการวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยนี้ แล้วดูผลการวิเคราะห์ว่าจะได้ผลในลักษณะเดียวกันหรือไม่

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ให้แนวคิด คำปรึกษาและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนให้โอกาสผู้วิจัยได้พัฒนากระบวนการคิด กระบวนการทำงานรวมทั้งประสบการณ์การเรียนรู้ตลอดเวลา และขอขอบคุณวิศวกรฝ่ายประสิทธิภาพ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในการให้ความร่วมมือส่วนข้อมูลโรงไฟฟ้า รวมทั้งยังเป็นทีปรึกษาที่ดีอีกด้วย

บรรณานุกรม

- [1] จรัส พิสัยพันธ์. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำความสะอาดใบพัดคอมเพรสเซอร์ของเครื่องกังหันก๊าซโรงไฟฟ้าน้ำพอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2552.
- [2] Aretakis, N., Roumeliotis, I., Doumouras, G. and Mathioudakis, K. Compressor washing economic analysis and optimization for power generation, *Applied Energy* 95 (2012) : 77-86.
- [3] Koch, J., DeGeeter, S., and Haynes, C. J. *Condenser, Compressor, and HRSG Cleaning in Combined Cycle: How often is too often?* [Online]. 1996. Available from : <http://www.heatrate.com/docs/Maintenance-Scheduling-1996.pdf>, accessed on 18/8/2013.
- [4] Kurz, R. and Brun, K. Gas Turbine Tutorial - Maintenance and Operation Practices Effects on Degradation and Life. *Proceeding of The Thirty-Sixth Turbomachinery Symposium*. (2007) : 173-185.
- [5] Cengel, Y. A. and Boles, M. A. *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th edition, McGraw-Hill. 2005.
- [6] สุเทพ จาวทวิภาส. สมรรถนะโรงไฟฟ้า (Power Plant Performance), เอกสารอบรมของศูนย์อบรมโรงไฟฟ้าบางปะกง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2555. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- [7] วันชัย วิจิรวณิช. *เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [8] สปีเจล อาร์ เมอร์เรย์. *ทฤษฎีและตัวอย่างโจทย์ สถิติและความน่าจะเป็น*. แปลโดย จินตนา เสริมพงษ์พันธ์. กรุงเทพมหานคร: แมคกรอ-ฮิล, 2539.
- [9] Boyce, P. M. *Gas Turbine Engineering Handbook*, 4th edition. Elsevier. 2012.
- [10] Meher-Homji, B. C. and Bromley, A. "Gas Turbine Axial Compressor Fouling and Washing", *Proceeding of The Thirty-third Turbomachinery Symposium*, (2004) : 163-192.