

ระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ในเครื่องกังหันก๊าซ

นาฏนิภา ชูจิตารมย์¹ วิทยา ยงเจริญ^{2*} และชนิษฐา เกิดพร³

¹ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10330

² จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10330

³ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

*yongchareon@gmail.com ,Mobile 086 8989486, Fax. 022522889

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ในเครื่องกังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม เนื่องจากประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ที่ลดลงส่วนใหญ่มาจากสิ่งสกปรกที่เกาะติดที่ใบพัดของคอมเพรสเซอร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าโดยรวมลดลง ดังนั้นการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ จะทำให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก เพิ่มกลับคืนมาได้ในระดับหนึ่ง โดยประสิทธิภาพที่เพิ่มจะขึ้นอยู่กับความถี่ในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ ได้มีการศึกษาและจัดเก็บข้อมูลจากการเดินเครื่องกังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ในระยะเวลาย้อนหลัง 2 ปี ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของคอมเพรสเซอร์คำนวณจาก ตัวแปรอิสระ คือ อุณหภูมิเข้าและออกจากคอมเพรสเซอร์ ความดันเข้าและออกจากคอมเพรสเซอร์ จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ โดยคิดจากค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดซึ่งประกอบด้วยค่าเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพที่ลดลง ค่าทำความสะอาด ค่าเดินเครื่อง ค่าปรับและค่าเสียโอกาส เพื่อเป็นการรักษาระดับการผลิตกำลังไฟฟ้าให้คงที่ จากผลการวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ลดลงด้วยอัตรา 0.0114 % ต่อวันและระยะเวลาทำความสะอาดที่เหมาะสมคือทำความสะอาดทุกๆ 5 เดือน ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายรวมในระยะเวลา 3 ปีต่ำสุด ในอีกมุมมองหนึ่งการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์จะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 4.05 Mm³/yr หรือประหยัดเงินได้ 39.25 ล้านบาทต่อปี และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 7985 ตันต่อปี

คำหลัก: การทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ ระยะเวลาที่เหมาะสม กังหันก๊าซ

Abstract

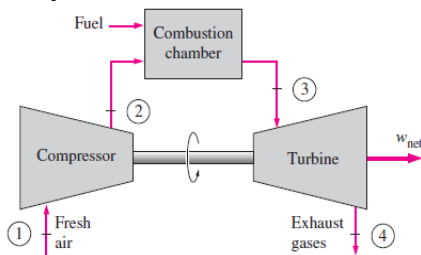
The aim of this research is to determine the optimal cleaning time interval of compressor in gas turbine of combined cycle power plant. A major cause of reducing compressor efficiency is from compressor blade fouling, which results in lower overall power plant efficiency. Compressor off-line cleaning can recover some of the lost of Isentropic Efficiency. The level of recovering efficiency depends on the cleaning time interval. The data was collected from the operational data of combined cycle power plant within the past 2 years. The independent variables, inlet & outlet compressor temperature and inlet & outlet compressor pressure, were used to determine the isentropic efficiency. The optimal cleaning time interval was analyzed by using the minimum total expense cost which consists of the additional fuel cost (due to degradation of plant efficiency), cleaning cost, startup cost fine cost, and lost opportunity cost In order to maintain the constant electrical power output. From the analysis it was found that the degradation of compressor efficiency was 0.0114% per day and the optimal cleaning time interval was every 5 months for 3 year resulting in minimum total expense cost. In other point of view, compressor cleaning will increase the efficiency

which result in fuel saving of 4.05 Mm³/yr or cost saving of 39.25 MB/yr and reducing carbon dioxide emitting of 7985 ton/yr

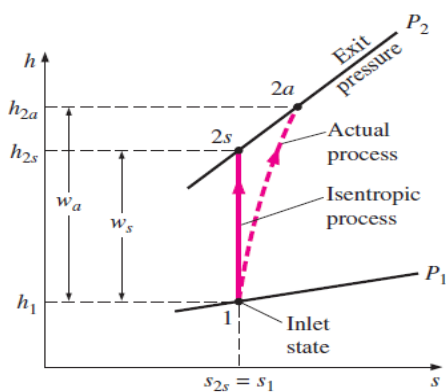
Keywords: Compressor Cleaning; Optimal Cleaning Time Interval; Gas Turbine

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plant) ซึ่งมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าการผลิตไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้าไอน้ำหรือโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซอย่างเดียวโดยมีการใช้ก๊าซเสียจากกังหันก๊าซไปผลิตไอน้ำเพื่อป้อนให้กับกังหันไอน้ำไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ที่ใช้ผลิตไฟฟ้า กังหันก๊าซประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ 1. คอมเพรสเซอร์ 2. ห้องเผาไหม้ และ 3. กังหัน ดังแสดงในรูปที่ 1 และกระบวนการอัดอากาศแสดงในรูปที่ 2



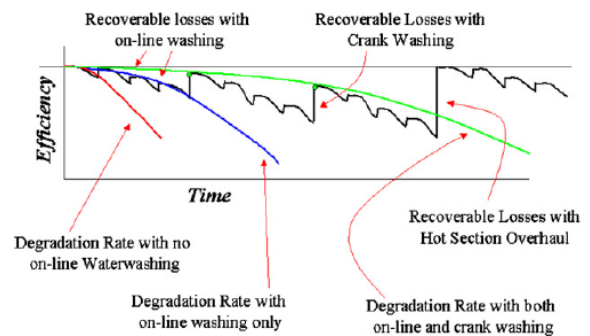
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของกังหันก๊าซ



รูปที่ 2 กระบวนการอัดอากาศ

ในการทำงานจะมีฝุ่นและความชื้นที่ปนเปื้อนมากับอากาศทำให้เกิดคราบสกปรกที่ตัวใบพัดของคอมเพรสเซอร์ทำให้ประสิทธิภาพลดลง คราบสกปรกที่ติดอยู่สามารถกำจัดไปได้โดยการล้างทั้งแบบออฟไลน์ (Off-line or crack washing) ซึ่งจะต้องทำขณะที่หยุดเดินเครื่องกังหันก๊าซ และแบบออนไลน์ (On-line washing) ซึ่งล้างคราบสกปรกขณะเดินเครื่อง การลดลงของประสิทธิภาพของกังหันก๊าซจะขึ้นกับแบบการล้าง

คอมเพรสเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการล้างแบบ off-line washing สามารถฟื้นฟูประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์ได้ดี กว่าแบบออนไลน์ [2]



รูปที่ 3 การลดลงของประสิทธิภาพกับแบบการล้าง
การล้างคอมเพรสเซอร์ แบบออฟไลน์ จำเป็นต้องหยุดเดินเครื่องกังหันก๊าซก่อนการล้าง ทำให้ต้องหยุดผลิตไฟฟ้าด้วย จึงเสียโอกาสในการขายไฟฟ้านอกจากนี้การล้าง คอมเพรสเซอร์ ยังมีค่าใช้จ่ายอื่น ๆ อีก เช่น ค่าใช้จ่ายทำความสะอาด ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินเครื่องระหว่างการทำความสะอาด ค่าเสียโอกาสและค่าปรับระหว่างหยุดเดินเครื่องเป็นต้น ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการล้างคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพในการอัดอากาศนิยมใช้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก η_c ตามสมการ ที่ 2

$$\eta_c = \frac{w_s (\text{Isentropic_work})}{w_a (\text{Actual_work})} \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (1)$$

หรือ

$$\eta_c = \frac{100 \times T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

เมื่อ

T_1 = อุณหภูมิขาเข้าคอมเพรสเซอร์
 T_2 = อุณหภูมิขาออกคอมเพรสเซอร์
 P_1 = ความดันขาเข้าคอมเพรสเซอร์
 P_2 = ความดันขาออกคอมเพรสเซอร์
 k = ค่าความร้อนจำเพาะ (อากาศ $k = 1.4$)
 h = เอนทัลปี (Enthalpy)
 s = ไอเซนโทรปิก (Isentropic)
 a = ปริมาณงานจริง (Actual)

2.2 อุณหภูมิของอากาศไหล

อุณหภูมิของอากาศไหล T คำนวณได้จาก
อุณหภูมิรวม T_0 (Total or Stagnation Temperature)
ที่ได้จากการวัดจริง ตามสมการที่ 3

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \quad (3)$$

$$c = \sqrt{kRT} \quad (4)$$

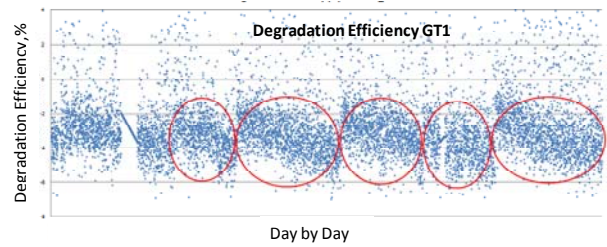
$$M = V / c$$

เมื่อ

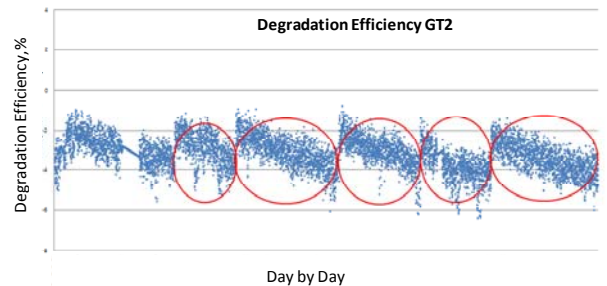
T = อุณหภูมิของอากาศไหล, K
 T_0 = อุณหภูมิรวมของอากาศ, K
 M = Mach number
 c = ความเร็วเสียง, mps
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ, J/kg.K
 V = ความเร็วอากาศ, m/s

3. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลก่อนและหลังการทำความเสียดคอมเพรสเซอร์ของเครื่องกังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมเป็นระยะเวลาย้อนหลัง 2 ปี โดยจัดเก็บข้อมูลจากการเดินเครื่องผลิตไฟฟ้ากังหันก๊าซจำนวน 2 เครื่อง ขนาดกำลังผลิตเครื่องละ 221 MW มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพโดยมีตัวแปรอิสระที่จะใช้ศึกษา คือ อุณหภูมิขาเข้าและออกจากคอมเพรสเซอร์ ความดันขาเข้าและขาออกจากคอมเพรสเซอร์ และระยะเวลาการทำงาน จากนั้นคำนวณหาประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ของทั้งสองกังหันก๊าซโดยใช้ค่าประสิทธิภาพในสภาวะอ้างอิงของคอมเพรสเซอร์ทั้งสองเป็น 93.41% ผลการลดลงของประสิทธิภาพ (Degradation Efficiency) หลังการทำความเสียดแบบออฟไลน์ แสดงดังรูปที่ 4



ก) คอมเพรสเซอร์ของกังหันก๊าซเครื่องที่ 1



ข) คอมเพรสเซอร์ของกังหันก๊าซเครื่องที่ 2
รูปที่ 4 การลดลงของประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์

เมื่อนำการลดของประสิทธิภาพมาหาความสัมพันธ์เทียบกับระยะเวลาหลังการทำความเสียด จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 5 สำหรับกังหันก๊าซเครื่องที่ 1 และสมการที่ 6 สำหรับกังหันก๊าซเครื่องที่ 2

$$y = 0.0104x + 2.5129 \quad (5)$$

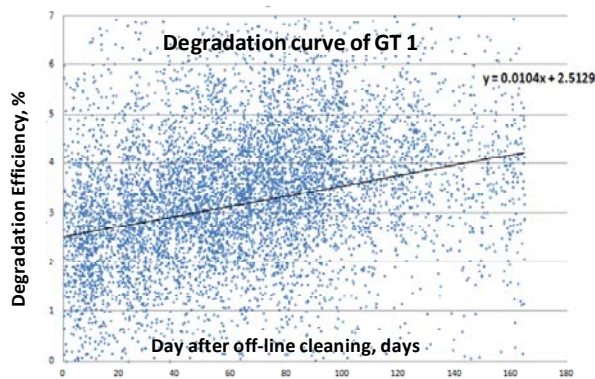
$$y = 0.0124x + 2.6231 \quad (6)$$

เมื่อ

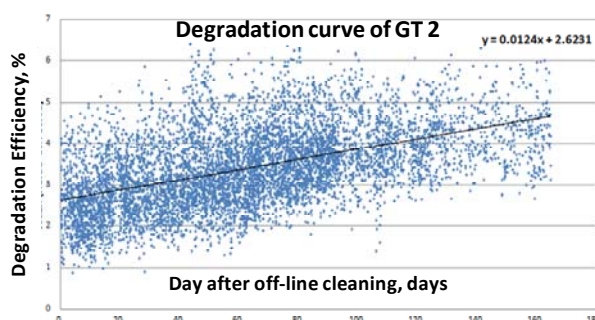
Y = การลดลงของประสิทธิภาพ, %

X = ระยะเวลาหลังการทำความเสียด, d

จากกราฟจะเห็นว่าข้อมูลมีความแปรผันสูงเนื่องจากประสิทธิภาพยังขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่น อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ โดยรอบที่คอมเพรสเซอร์ดูดเข้าไป นอกจากนี้อัตราการลดลงของประสิทธิภาพเฉลี่ยทั้งสองเครื่อง และการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานเฉลี่ยมีค่า 0.0114 % และ 2.6% ตามลำดับ



ก.คอมเพรสเซอร์ของกังหันก๊าซเครื่องที่ 1

ข.คอมเพรสเซอร์ของกังหันก๊าซเครื่องที่ 2
รูปที่ 5 การลดลงของประสิทธิภาพเทียบกับระยะเวลา

4. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย

4.1 ค่าทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์

ค่าใช้จ่ายการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ CO หาได้จากสมการที่ 7

$$CO = C1 + C2 + C3 + C4 + C5 + C6 \quad (7)$$

เมื่อ

C1 = ค่าปรับในระหว่างการหยุดเดินเครื่องโรงไฟฟ้า เป็นเงิน 4,000,000 บาท ต่อวัน

C2 = ค่าสารเคมีและค่าน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาด เป็นเงิน 60,000 บาท ต่อครั้ง

C3 = ค่าแรงในการทำความสะอาด เป็นเงิน 28,000 บาท ต่อครั้ง

C4 = ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินอุปกรณ์ระหว่างทำความสะอาดเป็นเงิน 12,000 บาท ต่อครั้ง

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

C6 = ค่าการสูญเสียกำไรอันเนื่องมาจากการหยุดการผลิตไฟฟ้า เป็นเงิน 2,818,356 บาท ต่อวัน

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายในการทำ ความสะอาด 2 วันในแต่ละครั้ง เป็นเงิน 14,836,712 บาท ต่อครั้ง

4.2 ค่าเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

ราคาก๊าซธรรมชาติเฉลี่ยอยู่ที่ 310 บาทต่อล้านบีทียู และ โรงไฟฟ้าเสียค่าก๊าซ 393 ล้านบาทต่อเดือนคิดเทียบเป็นฐานประสิทธิภาพ 100% ดังนั้นเมื่อคิดเป็นค่าก๊าซที่ต้องจ่ายเพิ่มขึ้นเป็น 0.131 MB/%/d ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง ค่าทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์และค่าใช้จ่ายรวมที่ระยะเวลาการทำความสะอาดในระยะเวลา 3 ปี ตั้งแต่ 3 ถึง 36 เดือนต่อครั้งแสดงในตารางที่ 1

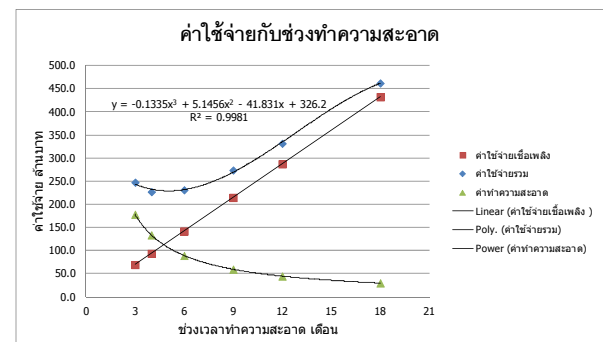
ตารางที่ 1 ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง ค่าทำความสะอาดและ

ค่าใช้จ่ายรวม

ช่วงเวลาความสะอาด	จำนวนครั้ง	ค่าการสูญเสียเชื้อเพลิง	ค่าทำความสะอาด	ค่าใช้จ่ายรวม
เดือน/ครั้ง	ในรอบ 36 เดือน	ล้านบาท	ล้านบาท	ล้านบาท
3	12	69.4	178.0	247.4
4	9	93.6	133.5	227.1
6	6	142.0	89.0	231.0
9	4	214.5	59.3	273.9
12	3	287.1	44.5	331.6
18	2	432.3	29.7	461.9
36	1	867.7	14.8	882.6

5. ระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาด

การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์หาได้จากค่าใช้จ่ายรวมด้านเชื้อเพลิงที่ใช้ในการรักษาลังไฟฟ้าที่ผลิตให้คงที่รวมกับค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดต่ำสุด [1] เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 1 มาพล็อตดังแสดงในรูปที่ 6 และหาสมการของค่าใช้จ่ายรวมได้ตามสมการที่ 8



รูปที่ 6 ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง ค่าทำความสะอาดและค่าใช้จ่ายรวม

$$Y = -0.1335X^3 + 5.1456X^2 - 41.831X + 326.2 \quad (8)$$

โดยมีค่า $R^2 = 0.9981$

สมการที่ 8 จะมีค่าต่ำสุดเมื่อ $\frac{dY}{dt} = 0$ จะได้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดที่ระยะเวลาการล้างที่ 5 เดือน / ครั้ง

6. การประหยัดเชื้อเพลิงก๊าซ

ก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบเชิงปริมาตรดังนี้ CH₄ 90.795% C₂H₂ 3.277% C₃H₈ 0.187% C₄H₁₀ 0.039% C₅H₁₂ 0.025% C₆H₁₄ 0.013% CO₂ 2.468% และ N₂ 3.196% จะมีค่า LHV เป็น 32.993 MJ/m³ และเมื่อสันดาปจะปล่อยก๊าซ CO₂ 1.851 kg/m³ ดังนั้นในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ 5 เดือนต่อครั้งในช่วงระยะเวลา 3 ปี จะลดเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ 12.414 Mm³ ลดการปล่อยก๊าซ CO₂ 22765 ton และประหยัดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง 117.76 ล้านบาท

7. สรุป

ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม จะลดลงเมื่อมีฝุ่นละอองและเขม่าควันที่ปนอยู่ในอากาศไปเกาะติดอยู่บนใบพัดของคอมเพรสเซอร์ การทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานเพิ่มขึ้นหลังการล้าง และจะลดลงตามระยะเวลาในการทำงานด้วยอัตราการลดลงที่ 0.0114 %/d ระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ จึงคิดจากค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดที่ใช้เพื่อรักษาระดับพลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้คงที่ จะได้ระยะเวลาในการทำความสะอาดเป็น 5 เดือนต่อครั้ง และในระยะเวลา 3 ปีจะลดเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ 12.414 Mm³ ลดการปล่อยก๊าซ CO₂ 22765 ton และประหยัดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง 117.76 ล้านบาท

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรฝ่ายประสิทธิภาพ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในการให้ความร่วมมือในส่วนข้อมูลโรงไฟฟ้า

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Aretakis, N., Roumeliotis, I., Doumouras G. and Mathioudakis K. 2012. Compressor washing economic

analysis and optimization for power generation, *Applied Energy* 95: 77-86.

- [2] Kurz, R. and Brun, K. 2007. "Gas Turbine Tutorial - Maintenance and Operation Practices Effects on Degradation and Life", *Proceeding of The Thirty-Sixth Turbomachinery Symposium*, 173-185.