

# การศึกษาผลการทำความสะอาดใบพัดของเครื่องอัดอากาศในเครื่องยนต์กังหันแก๊สของ โรงไฟฟ้าน้ำพอง

## A Study of Affects of Gas Turbine Compressor Blade Cleaning of Namphong Power Plant

จรัส พิสัยพันธ์ , ชนกนันท์ สุขกำเนิด และ สมหมาย ปรีเปรม

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 4002

โทร 0-4320-2845 โทรสาร 0-4320-2849 อีเมลล์ pisaipan@hotmail.com , chasoo@kku.ac.th , sompri@kku.ac.th

### บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศของเครื่องยนต์กังหันแก๊สมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศจะลดลงตามเวลาการใช้งานเนื่องจากความสกปรกที่เกิดขึ้นบนใบพัด การทำความสะอาดใบพัดเป็นวิธีการในการคืนประสิทธิภาพที่สูญเสียไป บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการล้างใบพัดของเครื่องอัดอากาศโดยวิธี Offline Cleaning ของโรงไฟฟ้าน้ำพอง และศึกษาผลของการทำ Offline Cleaning ต่อประสิทธิภาพ Isentropic ของเครื่องอัดอากาศ และผลต่อค่า power output ของเครื่องยนต์กังหันแก๊ส โดยทำการเก็บข้อมูลการเดินเครื่องกังหันแก๊สทุก 3 นาที รวมระยะเวลาการเก็บข้อมูล 3000 ชั่วโมงการทำงาน จากการศึกษาพบว่า การทำ Offline Cleaning สามารถช่วยในการคืนประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศได้ประมาณ 1-1.7% และค่า power output เพิ่มขึ้นได้ 3-5 MW

### Abstract

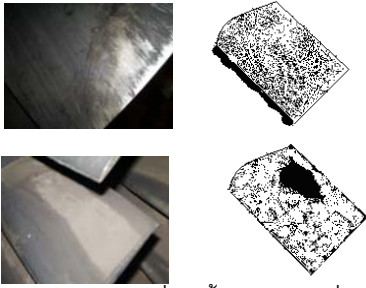
Gas turbine compressor efficiency has an important influence on combined cycle power plant efficiency. Gas turbine compressor efficiency degrades with its operating hour due to fouling on blades. The efficiency can be recovered by compressor blade cleaning. This study present compressor offline cleaning procedure of Namphong Power plant and affect of offline cleaning on compressor isentropic efficiency and gas turbine power output. Data was collected every 3 minute of 1500 operating hour. The results show that isentropic efficiencies gained after the off-line cleanings are between 1%-1.7% and the power output gained are between 3-5 MW.

### 1.บทนำ

โรงไฟฟ้าน้ำพอง เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม(Combined Cycle) ขนาดใหญ่ที่สุดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือเริ่มดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 มีขนาดกำลังผลิต 710 MW และสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ปีละ 4,660 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ประกอบด้วยหน่วยผลิตไฟฟ้า 2 ชุด กำลังผลิตชุดละ 355 MW แต่ละชุดมีหน่วยผลิตไฟฟ้ากังหันแก๊ส กำลังผลิต 121 MW สองเครื่อง และหน่วยผลิตไฟฟ้ากังหันไอน้ำกำลังผลิต 113 MW หนึ่งเครื่อง [1]

ในระบบของเครื่องกังหันแก๊สประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญสี่ส่วนได้แก่เครื่องอัดอากาศ ห้องเผาไหม้ และ กังหันแก๊ส โดยเพลลาของเครื่องอัดอากาศจะใช้ร่วมกันกับเพลลาของกังหันแก๊ส ซึ่งใช้พลังงานในการขับเคลื่อนประมาณ 60% ของพลังงานที่ผลิตได้จากกังหันแก๊ส [2] ดังนั้นหากมีการการสูญเสียที่เกิดขึ้นบนเครื่องอัดอากาศจะส่งผลโดยตรงต่อพลังงานที่ผลิตได้จากกังหันแก๊ส การเสื่อมสภาพของของเครื่องอัดอากาศในกังหันแก๊สมีสาเหตุหลักมาจากการที่ฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกอื่นๆไปเกาะที่ใบพัดของเครื่องอัดอากาศทำให้ความเสียดทานการไหลของอากาศสูงขึ้น ทำให้ต้องใช้งานในการขับเคลื่อนเครื่องอัดอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ Power Output ที่จะได้จากเครื่องกังหันแก๊สลดลง ดังนั้นจึงได้มีการขบวนการในการทำความสะอาดใบพัดเพื่อลดความสกปรกที่เกิดขึ้นบนเครื่องอัดอากาศโรงไฟฟ้าน้ำพองได้ทำการทำความสะอาดอยู่สองวิธีคือวิธี Off-line compressor cleaning ซึ่งจะต้องทำขณะที่ Shut down โรงไฟฟ้าและวิธี On-line compressor cleaning ซึ่งสามารถทำได้ในขณะที่เดินเครื่องโรงไฟฟ้า โดยบทความนี้กล่าวถึงการศึกษาผลของการทำวิธี Off-line compressor cleaning ว่ามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพ Isentropic ของเครื่องอัดอากาศ และผลต่อค่า power output ของเครื่องยนต์กังหันแก๊สอย่างไร

## 2. ความสกปรกในเครื่องอัดอากาศ



รูปที่ 1 แสดงความสกปรกที่เกิดขึ้นบนใบพัดเครื่องอัดอากาศ

ความสกปรกที่เกิดขึ้นบนใบพัดของเครื่องอัดอากาศเกิดจากโมเลกุลที่มีอยู่ในอากาศเช่น ฝุ่นละออง กรดเกลือในอากาศ ที่หลุดผ่านระบบการกรองเข้ามา ผลภาวะจากอุตสาหกรรม เช่น ควัน น้ำมันหล่อลื่นที่มีอยู่ในระบบของเครื่องกังหันแก๊ส สิ่งเหล่านี้จะเกาะติดที่ใบพัดของเครื่องอัดอากาศดังรูปที่ 1 ส่งผลให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอีกทั้งยังส่งผลให้อายุการใช้งานของใบพัดสั้นลง [2] โดยความสกปรกนี้ทำให้ใบพัดเกิดการผิดรูปขึ้นส่งผลให้มุมการไหลของอากาศเกิดความเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการอัดอากาศลดลง ค่า Flow Capacity ลดลงเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องกังหันแก๊สลดลง 70-85% [3] ซึ่งจากการทดลองในเครื่องกังหันแก๊สความดันต่ำใน 100 ชั่วโมงการทำงานพบว่าความสกปรกทำให้ค่าอัตราส่วนความดันลดลง 3-4% ในขณะที่ประสิทธิภาพลดลง 2-4% ส่วนเครื่องกังหันความดันสูงทดลองที่ระยะเวลาเท่ากันพบว่าอัตราส่วนความดันลดลง 10% ในขณะที่ประสิทธิภาพลดลง 6-7% [4] โดยการลดลงของประสิทธิภาพจะลดลงจนกระทั่งถึง 90% ของประสิทธิภาพเดิมจากนั้นจะคงที่ ปัจจัยที่มีผลต่อความสกปรกของเครื่องอัดอากาศได้แก่ ค่าการออกแบบเริ่มต้นของเครื่องอัดอากาศ สถานที่ตั้งของเครื่อง การบำรุงรักษาเครื่อง และสภาพของบรรยากาศโดยรอบ [5]

## 3. การทำความสะอาดใบพัดเครื่องอัดอากาศ

ผลจากความสกปรกของเครื่องอัดอากาศที่กล่าวมาแล้วนั้นทำให้มีความพยายามที่จะนำความสกปรกที่เกิดขึ้นนั้นออกทำให้มีการพัฒนาการทำความสะอาดเครื่องอัดอากาศขึ้นโดยในอดีตนั้นการล้างจะต้องหยุดเดินเครื่องแล้วนำชุดใบพัดออกมาทำความสะอาดที่ละใบซึ่งวิธีนี้ส่งผลให้เกิดความสิ้นเปลืองทั้งแรงงานและเวลา ต่อมาเพื่อเป็นการทุ่นเวลาและลดในส่วนของแรงงานคนที่เกิดจึงได้มีการพัฒนาวิธีการล้างเป็นการฉีดสารทำความสะอาดที่เป็นของแข็ง เช่น เปลือกข้าว เปลือกถั่ว หรือเรซิน เข้าสู่เครื่องอัดอากาศผ่านทางเดินอากาศในขณะที่เครื่องทำงานอยู่ ซึ่งต่อมาพบว่าวิธีการนี้ทำให้เกิดความเสียหายแก่ใบพัดเนื่องจากแรงกระแทก จึงได้มีการเปลี่ยนสารทำความสะอาดจากของแข็งเป็นของเหลวแทน โดยพบว่าสารทำความสะอาดที่เป็นของเหลวสามารถล้างได้ดีกว่าสารที่เป็นของแข็ง[3] ในการล้างโดยใช้ของเหลวเป็นสารทำความสะอาดนั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือแบบ Off-line ที่จะต้องหยุดเครื่องก่อนเพื่อลดอุณหภูมิภายในเครื่องอัดอากาศ และแบบ On-line ที่จะทำการฉีดสารทำความสะอาดเข้าไป

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 3 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

ระหว่างการเดินเครื่องปกติ ทำให้ต้องคำนึงถึงขนาดของหยดน้ำที่ฉีดว่าต้องไม่ให้เกิดแรงกระแทกกับใบพัดมากจนใบพัดเสียหาย โดยวิธี Off-line นั้นจะให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่าเนื่องวิธี On-line นั้นอุณหภูมิภายในเครื่องอัดอากาศจะสูงทำให้สารที่ฉีดเข้าไปเกิดการระเหยจึงล้างได้เพียงใบพัดในชุดแรกๆเท่านั้น แต่ในทางกลับกันวิธี Off-line จะสิ้นเปลืองมากกว่าทั้งแรงงานและเสียโอกาสเนื่องจากการหยุดเครื่อง

## 4. การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

ในการศึกษานี้ได้ทำการเก็บข้อมูลการทำความสะอาดแบบ Off-line ซึ่งโรงไฟฟ้าน้ำพองจะทำทุกๆ 3 เดือน และได้ทำการเก็บข้อมูลการเดินเครื่องจากเครื่องกังหันแก๊สทั้งหมดสี่เครื่องทุกๆ 3 นาทีเป็นระยะเวลารวม 3,000 ชั่วโมงทำงานเพื่อศึกษาผลของการทำความสะอาดต่อสภาพเครื่องอัดอากาศและค่ากำลังที่ได้จากเครื่องกังหันแก๊ส โดยเก็บข้อมูลที่ช่วงที่เครื่องกังหันก๊าซจ่ายโหลดเต็มพิกัด(base load) ซึ่งในช่วงที่ทำการเก็บข้อมูลมีการทำ Off-line compressor cleaning 6 ครั้ง ค่าที่ใช้ในการประเมินสภาพเครื่องอัดอากาศคือค่าประสิทธิภาพ Isentropic สามารถหาได้ด้วย

$$\eta_c = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

เมื่อ  $\eta_c$  = Compressor isentropic efficiency

$w_s$  = งานที่ใช้ในการเครื่องอัดอากาศ ในกรณีที่เป็น isentropic process

$w_a$  = งานที่ใช้ในการเครื่องอัดอากาศ ในกระบวนการที่เกิดขึ้นจริง

$h_2$  และ  $h_1$  = enthalpy ของอากาศที่ทางออกและทางเข้าของ Compressor ตามลำดับ

$h_{2s}$  = enthalpy ของอากาศที่ทางออกเครื่องอัดอากาศ ในกรณีที่เป็นกระบวนการ Isentropic

ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบงานที่ใช้ถ้ากระบวนการอัดเป็น Isentropic ต่องานจริงที่เครื่องอัดอากาศ นั้นต้องใช้โดยในที่นี้จะทำการเก็บข้อมูลดังนี้ Isentropic ได้แก่

- 1.ค่าอุณหภูมิทางเข้าเครื่องอัดอากาศ ( $T_1$ )
- 2.ค่าอุณหภูมิที่ทางออกเครื่องอัดอากาศ ( $T_2$ )
- 3.ความดันอากาศที่เข้าสู่เครื่องอัดอากาศ ( $P_1$ )
- 4.ความดันที่ออกจากเครื่องอัดอากาศ ( $P_2$ )
- 5.ความดันบรรยากาศ ( $P_{atm}$ )
- 6.ความดันลดที่ทางเข้าเครื่องอัดอากาศ ( $\Delta P$ )

โดยจะนำค่าทั้งหมดมาคำนวณหาค่า  $h_1 - h_2$  และ  $h_1 - h_{2s}$  จากสมการ

$$h_2 - h_1 = \left[ aT_2 + \frac{bT_2^2}{2} + \frac{cT_2^3}{3} + \frac{dT_2^4}{4} \right] - \left[ aT_1 + \frac{bT_1^2}{2} + \frac{cT_1^3}{3} + \frac{dT_1^4}{4} \right] \quad (2)$$

$T_2$  และ  $T_1$  แทน อุณหภูมิที่ทางออกและทางเข้าของ Compressor ตามลำดับ

a, b, c, d แทนค่าคงที่สำหรับ Specific heat at constant pressure ของก๊าซ

และ

$$h_{2s} - h_1 = \left[ aT_2 + \frac{bT_{2s}^2}{2} + \frac{cT_{2s}^3}{3} + \frac{dT_{2s}^4}{4} \right] - \left[ aT_1 + \frac{bT_1^2}{2} + \frac{cT_1^3}{3} + \frac{dT_1^4}{4} \right] \quad (3)$$

จากนั้นนำค่า  $h_1 - h_2$  และ  $h_1 - h_{2s}$  แทนลงในสมการ(1) ส่วนค่าค่ากำลังที่ได้จะแปลงให้เป็นค่ากำลังเทียบเท่าสภาวะมาตรฐาน(Corrected power) โดยมีสมการคือ

$$P_{Corrected} = K_a \times K_b \times K_e \times K_f \times K_g \times P_{output} \quad (4)$$

เมื่อ

$P_{Corrected}$  คือ ค่ากำลัง Corrected

$K_a$  คือ ค่าfactorเนื่องจากความดันบรรยากาศ

$K_b$  คือ ค่าfactorเนื่องจากอุณหภูมิที่เข้าสู่เครื่องอัดอากาศ

$K_e$  คือ ค่าfactorเนื่องจาก water injection

$K_f$  คือ ค่าfactorเนื่องจาก generator frequency

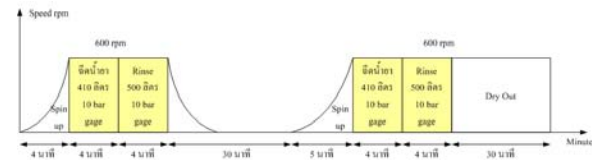
$K_g$  คือ ค่าfactorเนื่องจาก steam injection

## 5.กระบวนการทำความสะอาดแบบOff-Line ของโรงไฟฟ้าน้ำพอง

ในการทำความสะอาดแบบ Off-Lineของโรงไฟฟ้าน้ำพองนั้นจะทำการหยุดเดินเครื่องกังหันแก๊สเพื่อลดอุณหภูมิภายในเครื่องกังหันแก๊สโดยใช้เวลาประมาณ 1 วัน ในการทำ Off-line ของเครื่องกังหันแก๊สจะแบ่งเป็นรอบในแต่ละรอบจะมีขั้นตอนดังนี้

- 1.การ spin โดยใช้ starting motor ขับเครื่องกังหันแก๊สให้ความเร็วรอบอยู่ที่ 600 rpm ในขั้นตอนนี้ใช้เวลา 4 นาที
- 2.ทำการฉีดน้ำยาทำความสะอาดเป็นเวลา 4 นาที น้ำยาที่ใช้ทำความสะอาดนี้จะแบบ water base ชนิด Type II และ Type III ตามมาตรฐาน MIL-PRF-85704C ผสมส่วนของ โดยผสมน้ำยาเข้มข้นกับน้ำเปล่าในอัตราส่วน 1:19 การฉีดใช้น้ำยา 410 ลิตร ความดัน 10 barg
- 3.ทำการล้างน้ำยาโดยการฉีดน้ำตาม(Rinse) เป็นเวลา 4 นาทีใช้น้ำ 500 ลิตรความดัน 10 barg
- 4.ทำการหยุดเดินเครื่องอัดอากาศ

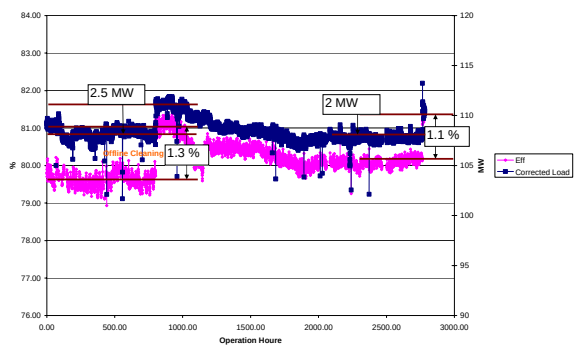
หากต้องการจะทำการรอบที่สองจะต้องทิ้งระยะเวลาจากการหยุดเครื่องไป 30 นาทีจึงเริ่มทำการรอบที่สองได้ ในการทำการรอบสุดท้ายนั้นหลังจากทำการ Rinseแล้วจะต้องเดินเครื่องอัดอากาศอีก 30 นาทีเป่าให้เครื่องแห้ง ซึ่งโดยปกติแล้วโรงไฟฟ้าน้ำพองจะทำการล้าง 2-3 รอบ ขึ้นอยู่ระดับความสกปรกของเครื่องอัดอากาศโดยปัจจุบันสังเกตจากลักษณะทางกายภาพของน้ำยาและน้ำล้างที่ออกมาจากการล้างรอบที่สองว่ามีสีอย่างไรถ้าสีออกดำและขุ่นจะทำการล้างรอบที่สามถ้าออกมาค่อนข้างใสจะล้างเพียงสองรอบ



รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการล้างในสองรอบ

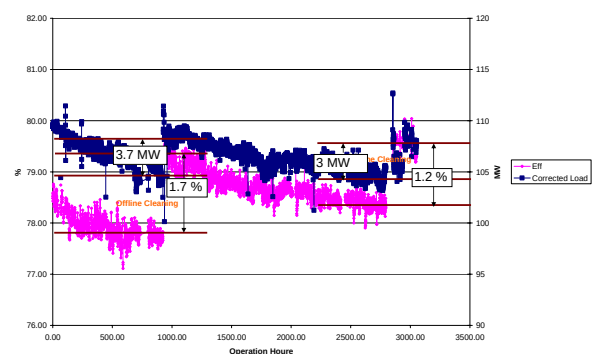
## 6. ผลของการทำOff-Lineต่อสภาพเครื่องอัดอากาศของโรงไฟฟ้าน้ำพอง

จากการเก็บข้อมูลได้ผลว่าในเครื่อง GT 11 มีการทำ Off-line 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 เริ่มทำเมื่อประสิทธิภาพIsentropicอยู่ที่ 79.7% และค่ากำลังผลิตที่ 107.71 MW ภายหลังการทำได้ประสิทธิภาพIsentropicเพิ่มขึ้น 1.3% ค่ากำลังที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 2.5 MW ครั้งที่ 2 เริ่มทำเมื่อประสิทธิภาพIsentropicอยู่ที่ 80.21% และค่ากำลังผลิตที่ 107.87 MW ภายหลังการทำได้ประสิทธิภาพIsentropic เพิ่มขึ้น 1.1% ค่ากำลังที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 2 MW ดังแสดงในรูปที่ 3



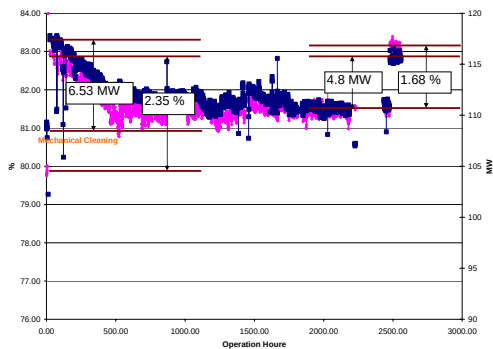
รูปที่ 3 แสดงข้อมูลการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพIsentropic และกำลังที่ได้ของเครื่อง GT 11

จากรูปที่ 4 แสดงเครื่อง GT 12 มีการทำ Off-line 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 เริ่มทำเมื่อประสิทธิภาพIsentropicอยู่ที่ 77.72% และค่ากำลังผลิตที่ 104.46 MW ภายหลังการทำได้ประสิทธิภาพIsentropic เพิ่มขึ้น 1.7% ค่ากำลังที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 3.7 MW ครั้งที่ 2 เริ่มทำเมื่อประสิทธิภาพIsentropicอยู่ที่ 78.36% และค่ากำลังผลิตที่ 103.31 MW ภายหลังการทำได้ประสิทธิภาพIsentropic เพิ่มขึ้น 1.2% ค่ากำลังที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 3 MW



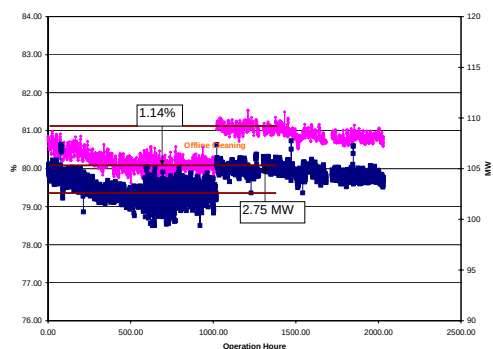
รูปที่ 4 แสดงข้อมูลการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพIsentropic และกำลังที่ได้ของเครื่อง GT 12

รูปที่ 5 เครื่อง GT 21 มีการทำ Off-line 1 ครั้งและมีการทำ Mechanical clean หนึ่งครั้ง การทำ Mechanical clean เริ่มทำเมื่อประสิทธิภาพ Isentropic อยู่ที่ 79.89% และค่ากำลังผลิตที่ 108.33 MW ภายหลังการทำได้ประสิทธิภาพ Isentropic เพิ่มขึ้น 2.35% ค่ากำลังที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 6.53 MW การทำ Off-line เริ่มทำเมื่อประสิทธิภาพ Isentropic อยู่ที่ 81.49% และค่ากำลังผลิตที่ 111.14 MW ภายหลังการทำได้ประสิทธิภาพ Isentropic เพิ่มขึ้น 1.68% ค่ากำลังที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 4.8 MW



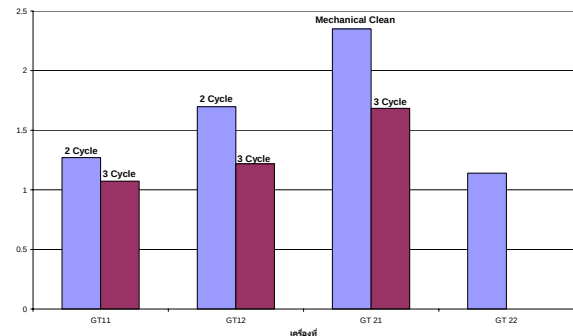
รูปที่ 5 แสดงข้อมูลการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพ Isentropic และกำลังที่ได้ของเครื่อง GT 21

รูปที่ 5 เครื่อง GT 22 มีการทำ Off-line 1 ครั้ง เริ่มทำเมื่อประสิทธิภาพ Isentropic อยู่ที่ 80.03% และค่ากำลังผลิตที่ 102.4 MW ภายหลังการทำได้ประสิทธิภาพ Isentropic เพิ่มขึ้น 1.14% ค่ากำลังที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 2.75 MW

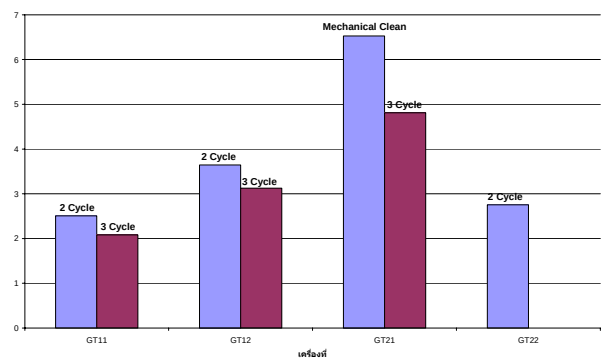


รูปที่ 6 แสดงข้อมูลการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพ Isentropic และกำลังที่ได้ของเครื่อง GT 22

เมื่อนำผลของการทำความสะอาดใบพัดเครื่องอัดอากาศทั้งหมดมาเขียนเป็นกราฟแท่งจะได้ผลดังรูปที่ 7 และ 8 จะเห็นได้ว่าการล้างแต่ละครั้งจะให้ผลออกมาไม่เท่ากันขึ้น ซึ่งในตัว GT 21 นั้นการล้างแบบ Mechanical จะเป็นการล้างที่ให้ผลดีที่สุดเนื่องจากการล้างที่ต้องถอดใบพัดมาทำความสะอาดที่ละเอียด



รูปที่ 7 แสดงการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพ Isentropic เนื่องจากการล้างแบบ Off-line



รูปที่ 8 แสดงการเพิ่มขึ้นของกำลังที่ผลิตได้เนื่องจากการล้างแบบ Off-line

## 7.สรุปผล

1. ค่าประสิทธิภาพ Isentropic เป็นตัวแสดงสภาพของเครื่องอัดอากาศที่ดี
2. ค่าประสิทธิภาพ Isentropic และค่ากำลัง Corrected เปลี่ยนแปลงลดลงตามเวลาเนื่องจากการสะสมของสิ่งสกปรก
3. การล้างเครื่องแบบ Off-line ช่วยให้ประสิทธิภาพ Isentropic ของเครื่องอัดอากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 1-1.7% และกำลัง corrected เพิ่มขึ้นได้ 3-5 MW

## 8.กิจกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินสำหรับการดำเนินการวิจัยนี้และขอขอบคุณพนักงานโรงไฟฟ้าน้ำพอง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ได้ให้การสนับสนุนการเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัยนี้

## 9.เอกสารอ้างอิง

1. [http://www.egat.co.th/th/index.php?option=com\\_content&task=view&id=51&Itemid=65](http://www.egat.co.th/th/index.php?option=com_content&task=view&id=51&Itemid=65)
2. Meherwan P. Boyce ,Francisco Gonzalez, JANUARY 2007, "A Study of On-Line and Off-Line Turbine Washing to Optimize the Operation of a Gas Turbine", ASME, Vol. 129, p114-122.

3. Friederike C. Mund, Pericles Pilidis, 2006, "Gas Turbine Compressor Washing: Historical Developments, Trends and Main Design Parameters for Online Systems", ASME Vol. 128.
4. Tae Won SONG, Jeong Lak SOHN, Tong Seop KIM, Jae Hwan KIM, and Sung Tack RO, 2003, "An Improved Analytic Model to Predict Fouling Phenomena in the Axial Compressor of Gas Turbine Engines", GTSJ
5. J.-P. Stalder, APRIL 2001, " Gas Turbine Compressor Washing State of the Art: Field Experiences" , ASME Vol. 123, p363-370