ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
209141

การพัฒนาวิธีเพื่อกำหนดแผนที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซโรงไฟฟ้าน้ำพอง

A DEVELOPMENT OF OPTIMUM SCHEDULE FOR NAM-PONG POWER PLANT GAS TURBINE COMPRESSOR CLEANING

นายธีพัฒน์ ลาภศรีหา

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2554

b00251505

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

209141

การพัฒนาวิธีเพื่อกำหนดแผนที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซโรงไฟฟ้าน้ำพอง

A DEVELOPMENT OF OPTIMUM SCHEDULE FOR NAM-PONG POWER PLANT GAS TURBINE COMPRESSOR CLEANING

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

นายรพีพัฒน์ ลาดศรีทา

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2554

การพัฒนาวิธีเพื่อกำหนดแผนที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซโรงไฟฟ้าน้ำพอง

นายรพีพัฒน์ ลาดศรีทา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2554

A DEVELOPMENT OF OPTIMUM SCHEDULE FOR NAM-PONG POWER PLANT GAS TURBINE COMPRESSOR CLEANING

MR. RAPHEEPHAT LADSRITHA

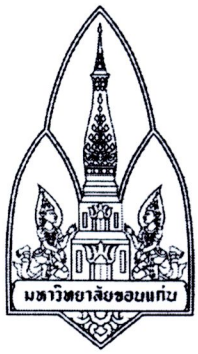
A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

IN MECHANICAL ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY

2011



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การพัฒนาวิธีเพื่อกำหนดแผนที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซโรงไฟฟ้าน้ำพอง

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์ : นายรพีพัฒน์ ลาดศรีทา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อ.ดร. ธีระชาติ พรพิบูลย์	ประธานกรรมการ
รศ.ดร. สมหมาย ปรีเปรม	กรรมการ
ผศ.ดร. ชนกนันท์ สุขกำเนิด	กรรมการ
อ.ดร. อัครพล จันทร์อ่อน	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมหมาย ปรีเปรม)

....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ลำปาง แม่นมาตย์) (รองศาสตราจารย์ ดร. สมนึก ธีระกุลพิศุทธิ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

รพีพัฒน์ ลาดศรีทา. 2554. ***การพัฒนาวิธีเพื่อกำหนดแผนที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซโรงไฟฟ้าน้ำพอง.*** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รศ.ดร. สมหมาย ปรีเปรม

บทคัดย่อ

209141

ในเครื่องกังหันก๊าซ คอมเพรสเซอร์ใช้งานที่ผลิตได้โดยตรงจากเทอร์ไบน์ถึงร้อยละ 60 หากคอมเพรสเซอร์เสื่อมสภาพลง เทอร์ไบน์จะต้องส่งงานมาขับคอมเพรสเซอร์เพิ่มมากขึ้น ทำให้งานส่วนที่จะต้องนำไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเทอร์ไบน์ลดน้อยลง ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคถูกนำมาใช้อธิบายการเสื่อมสภาพของคอมเพรสเซอร์ การลดลงของประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคทำให้เครื่องกังหันก๊าซสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่นั้นมาจากความสกปรกบนตัวใบพัดคอมเพรสเซอร์เอง การทำความสะอาดแบบออฟไลน์ทำให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคกลับคืนมา แต่จะต้องหยุดเดินเครื่องกังหันก๊าซ นั่นหมายถึงจะต้องสูญเสียโอกาสในการผลิตไฟฟ้า การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมกำหนดแผนการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซที่เหมาะสมที่สุดตลอดทั้งปี โดยอาศัยข้อมูลจริงจากโรงไฟฟ้าน้ำพองมาประกอบการคำนวณ

จากการศึกษาพบว่าค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิคลดลงตามชั่วโมงการทำงานและมีอัตราการลดลงที่แตกต่างกันไปในแต่ละเดือน โดยใช้สมการเส้นตรงมาอธิบายการลดลงดังกล่าวได้ ซึ่งมีอัตราการลดลงแบบสัมพัทธ์ระหว่าง 0.001 ถึง 0.035 % ต่อ 1000 ชั่วโมง การทำความสะอาดแบบออนไลน์มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิค ส่วนการทำความสะอาดแบบออฟไลน์ช่วยให้ค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิคเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.82% ถึง 3.42% เมื่อใช้วิธีจัดหมู่มาคำนวณหารูปแบบการทำความสะอาดที่เป็นไปได้ทั้งหมดได้ผลออกมาว่า หากรูปแบบการทำความสะอาดต่างกันผลประหยัดก็จะต่างกัน และคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซโรงไฟฟ้าน้ำพองควรทำความสะอาด 5 ครั้งต่อปีจึงจะมีผลประหยัดที่สุด ยกเว้นเครื่องกังหันก๊าซ GT11 ที่ต้องทำความสะอาดเพียง 4 ครั้งต่อปี ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องกังหันก๊าซ GT11 นั้นมีการลดลงของประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์ที่ต่ำกว่าเครื่องอื่นๆ และหากทำความสะอาดตามแผนดังกล่าวจะมีผลประหยัดอยู่ที่ 89.2 ถึง 111.7 ล้านบาทต่อปี และให้ผลประหยัดมากกว่าแผนการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ของโรงไฟฟ้าน้ำพองที่ทำอยู่ในปัจจุบันเฉลี่ย 8.2 ล้านบาทต่อปี

Raheephat Ladsritha. 2011. ***A Development of Optimum Schedule for Nam-pong Power Plant Gas Turbine Compressor Cleaning.*** Master of Engineering Thesis in Mechanical Engineering, Graduate School, Khon Kaen University.

Thesis Advisor: Assc.Prof.Dr.Sommai Pripream

ABSTRACT

209141

The gas turbine compressors consume about 60 percent of gas turbine power output. The compressor fouling causes higher power consumption by the compressor. Hence, the net power output and the efficiency from gas turbine are decreased by the fouled compressor. The compressor isentropic efficiency is used to indicate the compressor degradation. The decrease in compressor isentropic efficiency causes the higher fuel consumption. The compressor offline cleaning can recover the compressor isentropic efficiency. However, it requires shutting down of the power plant and its cost from cleaning and shutting down are very high. This research is aimed to develop the program from Nam-pong power plant offline compressor cleaning optimum scheduling thorough the year. The plant operation data is input to the model in order to find out the optimum cleaning schedule.

From the plant operation data, compressor isentropic efficiency decreased as operation hours and linear equation can be used to explain it and the degradation rate was between 0.0001 – 0.035 percent per 1000 hours. On-line cleaning gave significant effect on the degradation of isentropic efficiency. Off-cleaning increased isentropic efficiency between 0.82-3.42 percent. The combination method was used to calculate all possible compressor cleaning cases. It was found that the savings were influenced by the cleaning. The calculated saving from the developed program showed that Nam-Pong power plant gas turbine compressors should be cleaning 5 times per year except GT11 should be cleaning 4 times per year because GT11 degradation rate is lower than other. The saving from the off-line compressor cleaning is between 89.2-111.7 million baht per year which was 8.2 million baht per year higher than Nam-Pong power plant present plan.

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณพนักงานโรงไฟฟ้าน้ำพอง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ได้ให้การสนับสนุนการเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ปรีเปรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำชี้แนะ พร้อมทั้งสนับสนุนงานวิจัยและตรวจแก้วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชนกนันท์ สุขกำเนิด อาจารย์ประจำกลุ่มวิจัยประสิทธิภาพพลังงาน ที่ให้คำปรึกษา คำชี้แนะ พร้อมทั้งสนับสนุนงานวิจัยและตรวจแก้วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำชี้แนะ พร้อมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อัครพล จันทร์อ่อน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำชี้แนะ พร้อมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่กรุณาให้คำชี้แนะ คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ นายจรัส พิสัยพันธ์ ที่ได้ทำวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้มาก่อนหน้า รวมทั้งให้ข้อมูลบางส่วน และคำปรึกษาด้านวิชาการเบื้องต้น ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สารบรรณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกๆ ท่านที่มีส่วนช่วยในการประสานงาน และดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนนักศึกษาระดับปริญญาโท ที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้องทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจในการทำวิจัยและการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

รพีพัฒน์ ลาดศรีทา

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ข
กิตติกรรมประกาศ		ค
สารบัญตาราง		ช
สารบัญภาพ		ฌ
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
	1.2 จุดประสงค์การทำวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย	3
	1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย	3
	1.5 สถานที่ทำการวิจัย	5
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2	วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
บทที่ 3	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
	3.1 หลักการเบื้องต้นของเครื่องกังหันก๊าซ (Gas turbine)	13
	3.2 คอมเพรสเซอร์ (Compressor)	15
	3.3 วิธีการหาค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิค (Compressor Isentropic Efficiency)	16
	3.4 ความสกปรกในคอมเพรสเซอร์	20
	3.5 การทำความสะอาดใบพัดคอมเพรสเซอร์	21
	3.6 การวิเคราะห์ความแตกต่างของชุดข้อมูลเป็นคู่ (Paired t-test)	21
	3.7 โครงสร้างภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้กับ Visual Basic Applications บนโปรแกรม Microsoft Excel	23
	3.8 วิธีการจัดหมู่ (Combination)	27

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
บทที่ 4	การเก็บและวิเคราะห์ผลข้อมูล	
	4.1 ค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิค (Isentropic Efficiency) กับเวลา	28
	4.2 การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิค กับเวลา	33
	4.3 ผลการการทำความสะอาดแบบออนไลน์ต่ออัตราการลดลงของ ค่าประสิทธิภาพไอเซรทรอปิค	34
บทที่ 5	การพัฒนาโปรแกรม	
	5.1 การลดลงของประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์ของเครื่องกังหันก๊าซ โรงไฟฟ้าน้ำพอง	40
	5.2 ค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดใบพัดคอมเพรสเซอร์ด้วยวิธีออฟไลน์	44
	5.3 การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์หลังจากการทำ ความสะอาดแบบออฟไลน์	48
	5.4 โปรแกรมเพื่อกำหนดแผนที่เหมาะสมในการทำความสะอาด คอมเพรสเซอร์ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบออฟไลน์	55
บทที่ 6	ผลการศึกษา	
	6.1 ผลประหยัดเมื่อใช้รูปแบบการทำความสะอาดที่ต่างกันของโปรแกรม เพื่อกำหนดแผนที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์	60
	6.2 ผลประหยัดที่สุดจากโปรแกรมเพื่อกำหนดแผนที่เหมาะสมในการ ทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์	61
บทที่ 7	สรุปและวิเคราะห์ผลการศึกษา	
	7.1 สรุปผลการศึกษา	68
	7.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย	70
	7.3 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง		71

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ภาคผนวก		73
ภาคผนวก ก	คุณสมบัติของถังหันก๊าซโรงไฟฟ้าน้ำพอง	74
ภาคผนวก ข	ตัวอย่างโครงสร้างภาษาของโปรแกรมเพื่อกำหนดแผนที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์และวิธีการใช้งาน	76
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์		131
ประวัติผู้เขียน		132

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.1	แผนการเดินเครื่องเพื่อการเก็บข้อมูลในระยะที่ 1	34
ตารางที่ 4.2	แผนการเดินเครื่องเพื่อการเก็บข้อมูลในระยะที่ 2	34
ตารางที่ 4.3	แผนการเดินเครื่องเพื่อการเก็บข้อมูลในระยะที่ 3	34
ตารางที่ 5.1	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ที่ลดลงต่อชั่วโมงในเครื่องกังหันก๊าซ GT11	41
ตารางที่ 5.2	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ที่ลดลงต่อชั่วโมงในเครื่องกังหันก๊าซ GT12	42
ตารางที่ 5.3	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ที่ลดลงต่อชั่วโมงในเครื่องกังหันก๊าซ GT21	43
ตารางที่ 5.4	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ที่ลดลงต่อชั่วโมงในเครื่องกังหันก๊าซ GT22	43
ตารางที่ 5.5	ประสิทธิภาพที่เพิ่มหลังการทำความสะอาดแบบออฟไลน์ของเครื่องกังหันก๊าซ GT11	49
ตารางที่ 5.6	ประสิทธิภาพที่เพิ่มหลังการทำความสะอาดแบบออฟไลน์ของเครื่องกังหันก๊าซ GT12	51
ตารางที่ 5.7	ประสิทธิภาพที่เพิ่มหลังการทำความสะอาดแบบออฟไลน์ของเครื่องกังหันก๊าซ GT21	52
ตารางที่ 5.8	ประสิทธิภาพที่เพิ่มหลังการทำความสะอาดแบบออฟไลน์ของเครื่องกังหันก๊าซ GT22	54
ตารางที่ 5.9	จำนวนรูปแบบ (Case) การทำความสะอาดที่จะนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาผลประหยัดที่สุด ที่การล้าง ครั้ง/ปี	58
ตารางที่ 6.1	ตัวอย่างรูปแบบการทำความสะอาดที่ส่งผลให้ผลประหยัดแตกต่างกัน เมื่อมีการทำความสะอาด 4 ครั้ง/ปี บางรูปแบบจากโปรแกรมของเครื่องกังหันก๊าซ GT11	60
ตารางที่ 6.2	ผลจากโปรแกรมของเครื่องกังหันก๊าซ GT11	62
ตารางที่ 6.3	ผลจากโปรแกรมของเครื่องกังหันก๊าซ GT12	63
ตารางที่ 6.4	ผลจากโปรแกรมของเครื่องกังหันก๊าซ GT21	65
ตารางที่ 6.5	ผลจากโปรแกรมของเครื่องกังหันก๊าซ GT22	66
ตารางที่ 7.1	ผลประหยัดที่สุดเมื่อมีการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์แบบออฟไลน์ของเครื่องกังหันก๊าซแต่ละเครื่อง (ล้านบาท) และเดือนที่ควรจะทำความสะอาด	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 7.2 เปรียบเทียบผลประหยัดจากแผนการทำความสะอาดในการศึกษาครั้งนี้ กับผลประหยัดจากแผนการทำความสะอาดในปัจจุบันของ โรงไฟฟ้าน้ำพอง (ล้านบาท) 69

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1.1	แผนภาพวิธีการดำเนินงานวิจัย	4
ภาพที่ 2.1	ประสิทธิภาพเครื่องเก่า (Block I) และเครื่องใหม่ (Block II) ต่อชั่วโมงการทำงาน และระยะเวลาการเก็บข้อมูล	7
ภาพที่ 2.2	แผนผัง Model Predictive Control (MPC) optimization	8
ภาพที่ 2.3	แสดงผลการศึกษาที่พบว่าการทำ Off-line cleaning 5 ครั้งต่อปี จะเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด	9
ภาพที่ 2.4	แสดงแผนในการทำความสะอาดแบบ Off-line เครื่อง GT11	11
ภาพที่ 2.5	แสดงผลการประหยัดจากการสุ่มช่วงเวลาต่างๆในการทำความสะอาด แบบ Off-line เครื่อง GT11	11
ภาพที่ 2.6	แสดงค่ากำลังการผลิตที่แตกต่างไปจากข้อมูลจริง เนื่องจากจากการใช้ อนุกรม Fourier อันดับ n=4 มาอธิบาย	12
ภาพที่ 3.1	เครื่องกังหันก๊าซ	13
ภาพที่ 3.2	หลักการทำงานของเครื่องกังหันก๊าซ	14
ภาพที่ 3.3	แสดง P-V และ T-S diagram ของเครื่องกังหันก๊าซ	15
ภาพที่ 3.4	แสดงคอมเพรสเซอร์แบบกังหันชนิดอัดในแนวแกน (Axial flow compressor)	16
ภาพที่ 3.5	กระบวนการที่เกิดขึ้นบน Compressor (T-s diagram)	16
ภาพที่ 3.6	แผนผังโปรแกรมคำนวณหาค่า T_{2s}	19
ภาพที่ 3.7	แสดงความสกปรกที่เกิดขึ้นบนใบพัดคอมเพรสเซอร์	20
ภาพที่ 4.1	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซ GT11 ระหว่างเดือนมีนาคม 2551 – พฤษภาคม 2552	29
ภาพที่ 4.2	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซ GT11 ระหว่างเดือนกันยายน 2552 – ตุลาคม 2553	30
ภาพที่ 4.3	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซ GT12 ระหว่างเดือนมีนาคม 2551 – พฤษภาคม 2552	30
ภาพที่ 4.4	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซ GT12 ระหว่างเดือนกันยายน 2552 – ตุลาคม 2553	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.5	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซ GT21 ระหว่างเดือนมีนาคม 2551 – พฤษภาคม 2552	31
ภาพที่ 4.6	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซ GT21 ระหว่างเดือนกันยายน 2552 – ตุลาคม 2553	32
ภาพที่ 4.7	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซ GT22 ระหว่างเดือนมีนาคม 2551 – พฤษภาคม 2552	32
ภาพที่ 4.8	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของคอมเพรสเซอร์เครื่องกังหันก๊าซ GT22 ระหว่างเดือนกันยายน 2552 – ตุลาคม 2553	33
ภาพที่ 4.9	การเปรียบเทียบอัตราการลดลงของประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคเมื่อมีการทำและไม่ทำความสะอาดแบบออนไลน์กับเวลาของคอมเพรสเซอร์กังหันก๊าซ GT11	35
ภาพที่ 4.10	การเปรียบเทียบอัตราการลดลงของประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคเมื่อมีการทำและไม่ทำความสะอาดแบบออนไลน์กับเวลาของคอมเพรสเซอร์กังหันก๊าซ GT12	36
ภาพที่ 4.11	การเปรียบเทียบอัตราการลดลงของประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคเมื่อมีการทำและไม่ทำความสะอาดแบบออนไลน์กับเวลาของคอมเพรสเซอร์กังหันก๊าซ GT21	36
ภาพที่ 4.12	การเปรียบเทียบอัตราการลดลงของประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคเมื่อมีการทำและไม่ทำความสะอาดแบบออนไลน์กับเวลาของคอมเพรสเซอร์กังหันก๊าซ GT22	37
ภาพที่ 4.13	ผลของการวิเคราะห์ Paired t-Test เมื่อมีกับไม่มีการทำความสะอาดแบบออนไลน์ในคอมเพรสเซอร์กังหันก๊าซ GT11	37
ภาพที่ 4.14	ผลของการวิเคราะห์ Paired t-Test เมื่อมีกับไม่มีการทำความสะอาดแบบออนไลน์ในคอมเพรสเซอร์กังหันก๊าซ GT12	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.15	ผลของการวิเคราะห์ Paired t-Test เมื่อมีกับไม่มีการทำความสะอาดแบบออนไลน์ในคอมเพรสเซอร์กังหันก๊าซ GT21	38
ภาพที่ 4.16	ผลของการวิเคราะห์ Paired t-Test เมื่อมีกับไม่มีการทำความสะอาดแบบออนไลน์ในคอมเพรสเซอร์กังหันก๊าซ GT22	39
ภาพที่ 5.1	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคสัมพัทธ์ที่ลดลงต่อชั่วโมงในเดือนมีนาคม 2553 เครื่อง GT11	40
ภาพที่ 5.2	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคสัมพัทธ์ที่ลดลงต่อชั่วโมงในเดือนกรกฎาคม 2553 เครื่อง GT11	41
ภาพที่ 5.3	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของเครื่องกังหันก๊าซ GT11 ในปี 2552-2553	49
ภาพที่ 5.4	สมการจากข้อมูลในตารางที่ 5.5 เพื่อนำไปใช้ในโปรแกรม	49
ภาพที่ 5.5	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของเครื่องกังหันก๊าซ GT12 ในปี 2552-2553	50
ภาพที่ 5.6	สมการจากข้อมูลในตารางที่ 5.6 เพื่อนำไปใช้ในโปรแกรม	51
ภาพที่ 5.7	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของเครื่องกังหันก๊าซ GT21 ในปี 2552-2553	52
ภาพที่ 5.8	สมการจากข้อมูลในตารางที่ 5.7 เพื่อนำไปใช้ในโปรแกรม	53
ภาพที่ 5.9	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิคของเครื่องกังหันก๊าซ GT22 ในปี 2552-2553	54
ภาพที่ 5.10	สมการจากข้อมูลในตารางที่ 5.8 เพื่อนำไปใช้ในโปรแกรม	55
ภาพที่ 5.11	แผนภาพของโปรแกรมเพื่อกำหนดแผนที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบออฟไลน์	59
ภาพที่ 6.1	เปรียบเทียบผลการประหยัดรวมบางรูปแบบการทำความสะอาดเมื่อทำความสะอาด 4 ครั้ง/ปี จากโปรแกรมของเครื่องกังหันก๊าซ GT11	61
ภาพที่ 6.2	เปรียบเทียบผลการประหยัดรวมกับการล้าง ครั้ง/ปีของเครื่องกังหันก๊าซ GT11	62
ภาพที่ 6.3	เปรียบเทียบผลการประหยัดรวมกับการล้าง ครั้ง/ปีของเครื่องกังหันก๊าซ GT12	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 6.4	เปรียบเทียบผลการประหยัดรวมกับการล้าง ครั้ง/ปี ของเครื่องกังหันก๊าซ GT21	65
ภาพที่ 6.5	เปรียบเทียบผลการประหยัดรวมกับการล้าง ครั้ง/ปี ของเครื่องกังหันก๊าซ GT22	67