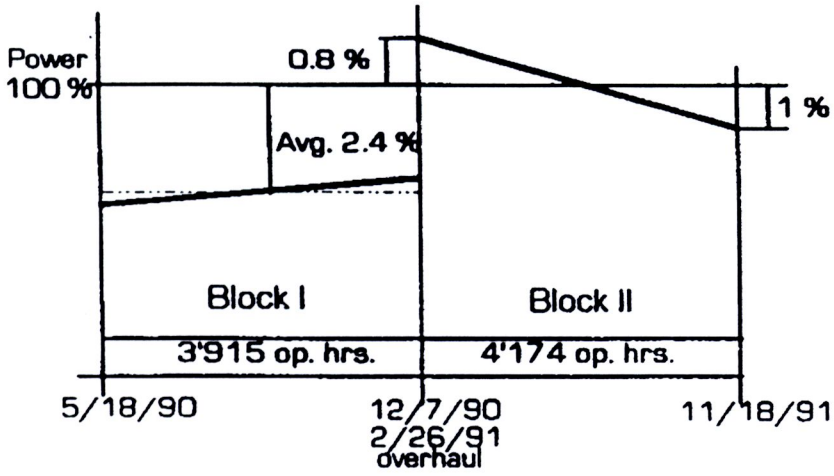
# บทที่ 2
# วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ในโลกเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (Hydro plant) รองลงมาคือโรงไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมหรือใช้กังหันก๊าซ (Combined-cycle and gas turbine plants) ส่วนรองอันดับที่สามคือโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินและลิกไนต์ (Steam-electric plants - coal and lignite) [14] ซึ่งจะเห็นได้ว่ากังหันก๊าซมีส่วนสำคัญไม่น้อยในการผลิตกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามกังหันก๊าซต้องใช้ก๊าซธรรมชาติมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ก๊าซธรรมชาติเป็นพลังงานฟอสซิลที่ใช้แล้วหมดไป จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ก๊าซธรรมชาติให้คุ้มค่าที่สุด กังหันก๊าซเป็นเครื่องจักรชนิดหนึ่งที่ประสิทธิภาพของมันจะต้องถดถอยลงตามเวลา และด้วยสาเหตุอื่นๆ เช่น การบำรุงรักษา สถานที่ตั้ง[4] กลับเป็นเหตุให้การใช้ก๊าซธรรมชาติไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร การรักษาหรือเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่เครื่องกังหันก๊าซจะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งกระทำได้หลายวิธีเช่น การพัฒนาออกแบบกังหันก๊าซใหม่ เป็นต้น แต่การดังกล่าวไม่อาจกระทำได้บ่อย หรือทุกครั้งไป เนื่องจากต้องอาศัยเวลา องค์ความรู้ใหม่ๆ และเงินทุนมหาศาล ส่วนวิธีที่สามารถทำได้เลยคือการบำรุงรักษา เช่น การเปลี่ยนอะไหล่ การทำความสะอาด ก็เป็นวิธีที่ช่วยรักษาหรือเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องกังหันก๊าซได้เช่นเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นเครื่องเก่าหรือใหม่ก็ตาม [9] ดังเช่นในงานวิจัยของ Stalder [9] ได้พบว่าการทำความสะอาดนั้นมีด้วยกัน 2 วิธี คือวิธี Off-line cleaning ซึ่งจะต้องทำขณะที่หยุดเดินเครื่องกังหันก๊าซและวิธี On-line cleaning ซึ่งสามารถทำได้ในขณะที่เดินเครื่องกังหันก๊าซ และพบว่าทั้งสองวิธีไม่ว่าจะทำอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือทั้งสอง ก็ทำให้ประสิทธิภาพ(Efficiency) และค่ากำลังการผลิต (Power Output) กลับคืนมาได้

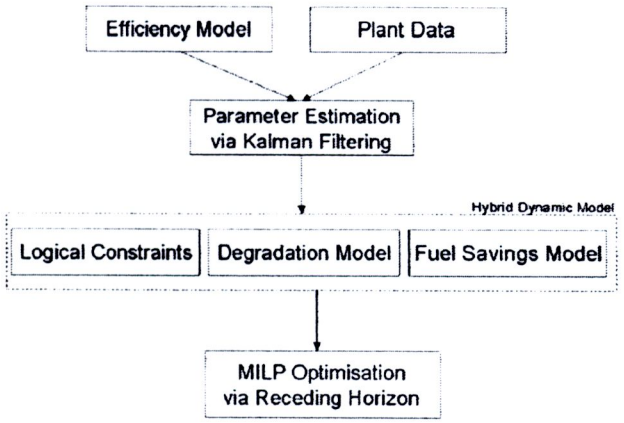



**ภาพที่ 2.1** ประสิทธิภาพเครื่องเก่า (Block I) และเครื่องใหม่ (Block II) ต่อชั่วโมงการทำงาน และระยะเวลาการเก็บข้อมูล [9]

เช่นเดียวกับ Leusden และคณะ [7] ที่พบว่าการทำความสะอาดทำให้ประสิทธิภาพ และค่ากำลังการผลิตสูงขึ้น 0.27 %และ 0.33% ตามลำดับ ส่วนสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของกังหันก๊าซนั้นลดลงเร็วกว่าที่ควรจะเป็น Stalder [9] เชื่อว่าโรงไฟฟ้าที่ทำการเก็บข้อมูลนั้นอยู่ในแหล่งอุตสาหกรรมเคมี มีการคมนาคมหนาแน่น และอยู่ใกล้ทะเล ทำให้คอมเพรสเซอร์สกปรก ต่อมา Song และคณะ[8] ได้ค้นพบว่า สาเหตุนั้นมาจากการที่ความสกปรกไปทำให้เกิดแรงเสียดทานการไหลระหว่างอากาศกับใบพัดคอมเพรสเซอร์สูงขึ้น ทำให้ต้องใช้งานในการขับเครื่องอัดอากาศมากขึ้น หรือ Power output ของเครื่องกังหันก๊าซลดลงนั่นเอง [11] นอกจากนี้ Song และคณะ [8] ยังพบว่าความสกปรกในคอมเพรสเซอร์ยังทำให้อัตราส่วนความดัน (Pressure Ratio) ของเครื่องคอมเพรสเซอร์ลดลง ไม่ว่าเครื่องคอมเพรสเซอร์นั้นจะเป็นชนิดความดันสูง (High pressure compressor) ลดลง 10% หรือชนิดความดันต่ำ (Low pressure compressor) ลดลง 3-4% ก็ตาม เช่นเดียวกับ Mund และ Pilidis [4] ที่พบว่าความสกปรกบนใบพัดคอมเพรสเซอร์ทำให้อัตราความร้อน (Heat Rate) ของเครื่องกังหันก๊าซเพิ่มขึ้น 5.5 % และมีผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องกังหันแก๊ส 70-85%

แต่ทั้ง 4 ผู้วิจัยข้างต้น [4,7-9] เพียงแต่ใช้ข้อมูลทางสถิติมาวิเคราะห์ว่าความสกปรกส่งผลกระทบอย่างไรบ้างเท่านั้น ยังไม่มีใครคิดเรื่องแผนในการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์เลย Hovland และ Antoine [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับแผนการทำความสะอาดแบบ On-line และ Off-line โดยใช้ Model Predictive Control (MPC) optimization ซึ่งเป็นวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบผสม (Hybrid) สร้างจากแบบจำลองของการลดลงของประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ แบบจำลองด้าน

เศรษฐศาสตร์และ ฟังก์ชันเงื่อนไขแบบตรรกศาสตร์ ซึ่งพบว่าหากใช้วิธีนี้ช่วยลดค่าใช้จ่ายลงมาจากเดิมเหลือเพียง 34%




**ภาพที่ 2.2** แผนผัง Model Predictive Control (MPC) optimization [6]

เช่นเดียวกับ Arbei [5] ที่ได้ใช้สมการทางด้านเศรษฐศาสตร์ได้แก่

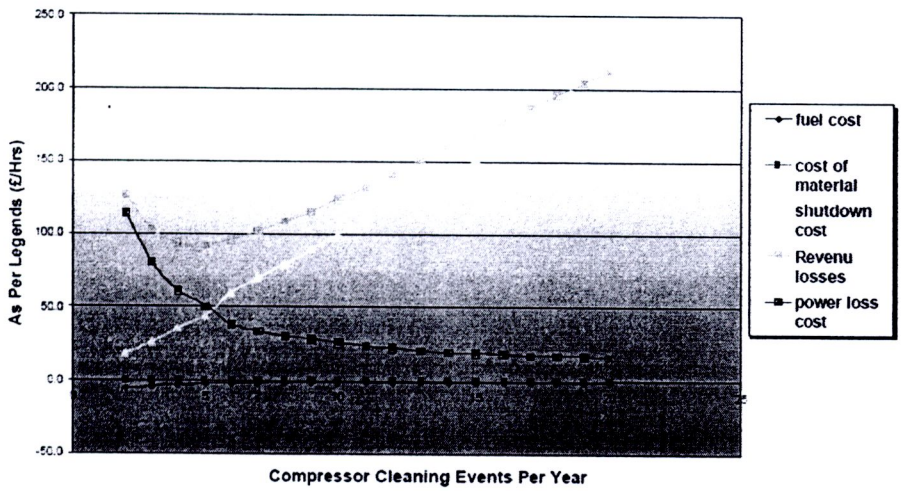
1. ค่าใช้จ่ายรวม = ค่าใช้จ่ายเมื่อคอมเพรสเซอร์มีสภาพสะอาดตลอดเวลา – ค่าใช้จ่ายเมื่อคอมเพรสเซอร์มีการเสื่อมสภาพ

2. ค่าใช้จ่ายเมื่อคอมเพรสเซอร์มีสภาพสะอาดตลอดเวลา = มูลค่าที่ได้จากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ – ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้

3. ค่าใช้จ่ายเมื่อคอมเพรสเซอร์มีการเสื่อมสภาพ = กำลังผลิตที่สูญเสียเนื่องจากการเสื่อมสภาพ – ค่าเชื้อเพลิงที่ไม่ได้ใช้เมื่อหยุดเครื่องทำความสะอาด + ค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด

4. ค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด = ค่าสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ + ค่าเสียโอกาสจากการหยุดเดินเครื่องกังหันก๊าซ

มาหาผลประหยัดจากแผนการทำความสะอาดซึ่งพบว่าการทำ Off-line cleaning 5 ครั้งต่อปีจะเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด




**ภาพที่ 2.3** แสดงผลการศึกษาที่พบว่าการทำ Off-line cleaning 5 ครั้งต่อปีจะเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด [5]

และทางด้านวิธี On – line cleaning นั้น Omar[3] ที่ได้ใช้สมการทางด้านเศรษฐศาสตร์ได้แก่

1. ค่าน้ำยาในการล้าง=ปริมาณน้ำยาที่ใช้ (ลิตร) x ราคาน้ำยา (บาท/ลิตร)
2. ค่าแรงงานคนที่ใช้เพิ่ม = จำนวนครั้งที่ล้าง x ค่าแรงเพิ่มเติมต่อครั้ง
3. ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้เพิ่ม = Fuel Flow (ลบ.ม./วินาที ) x Low Heating Value (บีทียู/ลบ.ม.) x ชั่วโมงการทำงาน x ราคาเชื้อเพลิงต่อล้านบีทียู
4. ค่าเสื่อมสภาพของใบพัดคอมเพรสเซอร์=ค่าชุดใบพัด/อายุการใช้งาน
5. ค่าใช้จ่ายรวม = ค่าน้ำยาในการล้าง+ค่าแรงงานคนที่ใช้เพิ่ม+ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้เพิ่ม+ค่าเสื่อมสภาพของใบพัดคอมเพรสเซอร์

มาหาผลประหยัดจากแผนการทำความสะอาดซึ่งพบว่าการทำ On-line cleaning ทุกๆ 4 อาทิตย์ ให้ผลประหยัดดีที่สุด

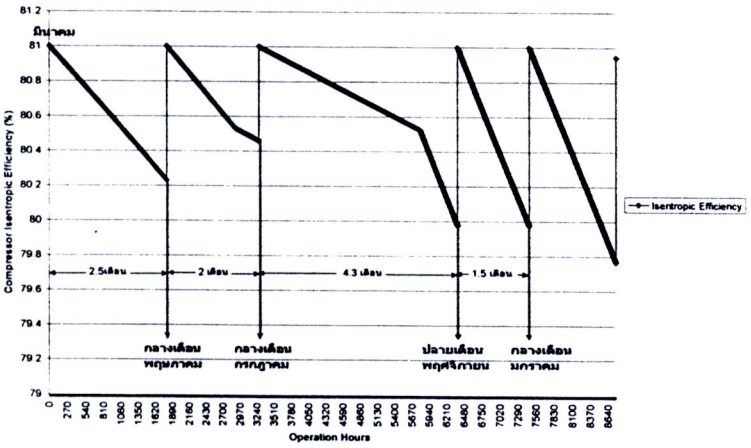
จะเห็นได้ว่ามีหลายตัวแปรที่เป็นส่วนสำคัญในแผนการทำความสะอาดที่ให้ผลประหยัดที่สุด อย่างไรก็ตามยังไม่มีผู้วิจัยใด [3 – 9] ศึกษาพารามิเตอร์ที่จะแสดงสภาพของเครื่องอัดอากาศโดยตัดปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องออกไป Boyce และ Gonzalez [2] จึงได้ใช้ประสิทธิภาพอะเดียบาติกของคอมเพรสเซอร์ (Compressor Adiabatic Efficiency) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงสภาพของ

คอมเพรสเซอร์ โดยทำการหาค่าประสิทธิภาพอะเดียบาติกของคอมเพรสเซอร์ (Compressor adiabatic efficiency,$\eta_{ad}$ ) ดังสมการ

$$\eta_{ad} = \frac{\text{Isentropic Work}}{\text{Actual Work}} \qquad (2.1)$$

โดยหากคอมเพรสเซอร์มีความสะอาดจะมีความเสียดทานที่ ใบพัดเครื่องอัดอากาศ น้อยจะทำให้ งานที่ใช้จริง (Actual work) มีค่าเข้าใกล้งานที่ใช้ในอุดมคติ (Isentropic work) ทำให้ค่าประสิทธิภาพอะเดียบาติกของเครื่องอัดอากาศมีค่าสูง ในทางตรงกันข้าม หากคอมเพรสเซอร์มีความสกปรกจะมีความเสียดทานที่ใบพัดเครื่องอัดอากาศมากจะทำให้งานที่ใช้จริงมีค่าห่างจากงานที่ใช้ในอุดมคติทำให้ค่า ประสิทธิภาพอะเดียบาติกมีค่าต่ำ โดย Boyce และ Gonzalez [2] ได้ใช้ค่าประสิทธิภาพอะเดียบาติก ในการติดตามสภาพของคอมเพรสเซอร์ พบว่าการทำความสะอาดคอมเพรสเซอร์ ด้วยวิธีการทำความสะอาดแบบออฟไลน์และวิธีการทำความสะอาดแบบออนไลน์จะทำประสิทธิภาพอะเดียบาติกของคอมเพรสเซอร์ลดลงเพียง 0.2% ในขณะที่ คอมเพรสเซอร์ที่ไม่มีการทำความสะอาดเลยจะทำให้ประสิทธิภาพอะเดียบาติกของคอมเพรสเซอร์ลดลงถึง 2.5% และทำให้ค่าอัตราความร้อน(Heat Rate) ของเครื่องกังหันก๊าซเพิ่มขึ้นถึง 2.7%

จรัส พิสัยพันธ์[10] ได้ใช้ค่า Compressor isentropic efficiency ซึ่งค่า Entropy จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิมาอธิบายสภาพของคอมเพรสเซอร์ นอกจากนี้ยังใช้ Heat rate, Fuel consumption และค่าใช้จ่ายต่างๆในการทำความสะอาดมาวิเคราะห์การเสื่อมสภาพคอมเพรสเซอร์ของเครื่องกังหันก๊าซโรงไฟฟ้าน้ำพองขนาด 121 MW จำนวน 4 เครื่อง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำความสะอาด พบว่าการใช้ Compressor isentropic efficiency สามารถอธิบายสภาพของคอมเพรสเซอร์ได้ดี, การทำความสะอาดแบบ On-line ไม่มีผลต่อการกลับคืนมาของประสิทธิภาพ, การลดลงของ Compressor isentropic efficiency ขึ้นอยู่กับฤดูกาล, การทำความสะอาดแบบ Off-line ช่วยให้ได้ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์กลับคืนมา 1-1.7%, Power output กลับมา 3-5 MW และการทำความสะอาดแบบ Off-line แบบกำหนดความถี่ความห่างของการทำขึ้นอยู่กับอัตราการลดลงของ Compressor isentropic efficiency ให้ผลประหยัดที่สุดที่ 1.9 ล้านบาท/ปี/เครื่อง เมื่อเทียบกับแผนการทำความสะอาดที่โรงไฟฟ้าทำอยู่ในขณะนั้น

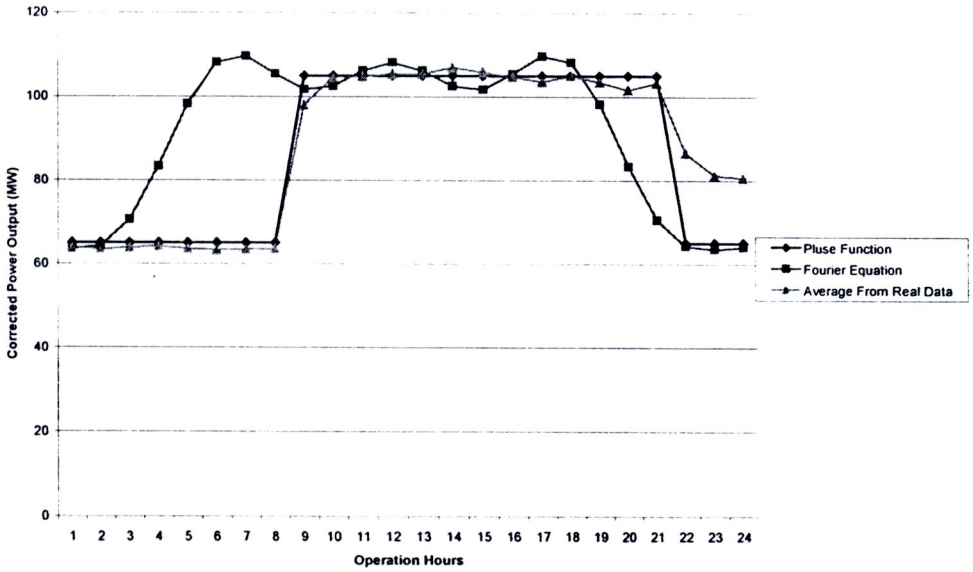



**ภาพที่ 2.4** แสดงแผนในการทำความสะอาดแบบ Off-line เครื่อง GT11 [10]

แต่วิธีที่ จรัส พิสัยพันธ์[10] อาศัยอนุกรมฟูเรียร์ ลำดับ n=4 มาคิดค่ากำลังการผลิตที่ทางโรงไฟฟ้าน้ำพองมีการแบ่งค่ากำลังการผลิตเป็นสองช่วงในแต่ละวัน คือช่วง Peak (08:00 – 24:00 น. เดินค่ากำลังการผลิตที่ 105 MW) และ Off-peak (00:00 – 08:00 น. เดินค่ากำลังการผลิตที่ 65 MW) ทำให้ค่ากำลังการผลิตที่คำนวณได้ไม่สอดคล้องกับค่ากำลังการผลิตที่เกิดขึ้นจริงเพราะการใช้อนุกรมฟูเรียร์จะต้องอินทริเกรตอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในความเป็นจริงในระหว่างการทำ Off-line cleaning จะต้องหยุดเดินเครื่องกังหันก๊าซ หรือไม่มีค่ากำลังการผลิตนั่นเอง นอกจากนี้การใช้อนุกรมฟูเรียร์ยังมีความยุ่งยากในการคำนวณเนื่องจากต้องสร้างสมการใหม่ทุกครั้งซึ่งไม่ยืดหยุ่นหากมีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังการผลิต จรัส พิสัยพันธ์[10] ยังใช้วิธีสุ่มหาค่าช่วงเวลาในการทำความสะอาดขึ้นมา ซึ่งทำให้ผลประหยัดที่คำนวณได้อาจไม่ใช่ผลประหยัดสูงสุด

| จำนวนครั้งที่ทำการล้าง | ความถี่ในการล้าง | GT11 | |
|---|---|---|---|
| | | ราคาเชื้อเพลิง(บาท) | ผลการประหยัด(บาท) |
| 1 | No cleaning | 1,681,696,372 | -2,958,204 |
| 2 | 6 เดือน/ครั้ง | 1,656,019,082 | 19,760,882 |
| 3 | 4 เดือน/ครั้ง | 1,645,809,726 | 27,012,034 |
| 4 | 3 เดือน/ครั้ง | 1,637,953,863 | 31,909,693 |
| 5 | 2.5 เดือน/ครั้ง | 1,634,309,737 | 32,595,616 |
| 6 | 2 เดือน/ครั้ง | 1,632,448,940 | 31,498,208 |
| 7 | 1.7 เดือน/ครั้ง | 1,630,059,319 | 30,929,626 |
| 8 | 1.5 เดือน/ครั้ง | 1,628,694,809 | 29,335,932 |
| 9 | 1.3 เดือน/ครั้ง | 1,627,853,629 | 27,218,908 |

**ภาพที่ 2.5** แสดงผลการประหยัดจากการสุ่มช่วงเวลาต่างๆในการทำความสะอาดแบบ Off-line เครื่อง GT11 [10]




**ภาพที่ 2.6** แสดงค่ากำลังการผลิตที่แตกต่างไปจากข้อมูลจริง เนื่องจากจากการใช้อนุกรม Fourier อันดับ n=4 มาอธิบาย [10]